

UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE

Přírodovědecká fakulta

Katedra fyzické geografie a geoekologie

Studijní program: Geografie

Studijní obor: Fyzická geografie a geoekologie



Martin LULÁK

VÝVOJ RELIÉFU V OBLASTI IMPAKTNÍHO KRÁTERU SILJAN

RELIEF EVOLUTION IN REGION OF THE SILJAN IMPACT CRATER

Diplomová práce

Vedoucí diplomové práce: Prof. RNDr. Jan Kalvoda, DrSc.

Praha 2015

Zadání diplomové práce

Název práce

Vývoj reliéfu v oblasti impaktního kráteru Siljan

Cíle práce

Hlavním výzkumným cílem diplomové práce je zjištění hlavních etap vývoje reliéfu v oblasti impaktního kráteru Siljan. Struktura práce zahrnuje popis přírodního prostředí studovaného území, charakteristiku impaktní události a impaktoru, geomorfologickou analýzu současných povrchových tvarů a komplexní interpretaci zjištěných analytických poznatků z této lokality. Dále jsou zdůrazněny zachované geologické a geomorfologické relikty impaktu Siljan a diskutovány v širších souvislostech velkých impaktních událostí na Zemi.

Použité pracovní metody, zájmové území a datové zdroje

Terénní rekognoskace studované oblasti následovala po podrobném hodnocení regionální literatury a kritickém rozboru dostupných grafických a dalších dokumentačních podkladů. Standardní geomorfologická analýza oblasti impaktního kráteru Siljan směřovala k výběru a dokumentaci typických lokalit povrchových tvarů různé geneze a stáří. Následná interpretace zjištěných údajů a získaných analytických poznatků umožnila charakterizovat hlavní etapy vývoje reliéfu tohoto území. Téma diplomové práce je součástí jednoho z výzkumných okruhů, které jsou řešeny odborným týmem geomorfologie a geodynamiky v rámci programu PRVOUK č. 43 „Geografie“ na přírodovědecké fakultě Univerzity Karlovy v Praze.

Datum zadání: 11. 12. 2012

Jméno studenta: Bc. Martin Lulák

Podpis studenta:

Jméno vedoucího práce: Prof. RNDr. Jan Kalvoda, DrSc.

Podpis vedoucího práce:

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval samostatně, a že jsem uvedl všechny použité zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze dne 27. 4. 2015

Podpis



Impaktní kráter Siljan zachycený z oběžné dráhy družicí pro dálkový průzkum Země Landsat 7 (USGS/NASA).

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval především panu prof. RNDr. Janu Kalvodovi, DrSc. za ochotné vedení této práce a užitečné odborné rady. Další člověk, který si zde zaslouží velké poděkování, je pan Thomas Jacobs, hlavní řešitel projektu Geopark Meteorum, který mi umožnil terénní geomorfologický průzkum impaktního kráteru Siljan ve Švédsku.

Abstrakt

Impaktní události a procesy s nimi spojené mohou při katastrofickém průběhu podstatně přetvářet přírodní prostředí Země i dalších těles sluneční soustavy. Impaktní kráter Siljan ve středním Švédsku, který vznikl v pozdním devonu, je dosud největší zjištěná morfostruktura tohoto druhu v Evropě. Předložená práce se zabývá vývojem reliéfu v oblasti impaktního kráteru Siljan. Byly studovány povrchové tvary tohoto území, včetně reliktních impaktní události a určeny hlavní etapy vývoje reliéfu od paleozoika do současnosti. Zvláštní pozornost je věnována diskuzi o rozsahu a typech erozních a denudačních procesů ve vztahu ke stupni zachování morfologických a geologických indicií tohoto devonského impaktu. Zjištěné regionální poznatky o reliktech impaktní události Siljan jsou porovnány s vybranými impaktními krátery na Zemi, Měsíci a Marsu.

Klíčová slova: geomorfologie, impaktní kráter Siljan, vývoj povrchových tvarů, Švédsko

Abstract

Impact events and associated processes can significantly reshape the natural environment of the Earth and other bodies in the Solar system. The Siljan impact crater in the middle of Sweden was created in late Devonian and it is the biggest known morphostructure of this kind in Europe. The presented paper aims at the relief evolution of the Siljan impact crater area. Landforms of the region are studied, including relicts of the impact event, and main stages of relief evolution from the Paleozoic to the present are determined. Special attention is focused to discussion about the range and types of erosional and denudational processes in relation to the level of preservation of morphological and geological indices about the Devonian impact. Ascertained knowledge about relicts of the Siljan impact event are compared with selected impact craters on the Earth, the Moon and Mars.

Key words: geomorphology, impact crater Siljan, landform evolution, Sweden

Obsah

1. Úvod	9
1.1 <i>Téma a cíle práce</i>	9
1.2 <i>Metody výzkumu a postup prací</i>	10
2. Přírodní prostředí území impaktního kráteru Siljan	12
2.1 <i>Geografická poloha, geologické a morfologické poměry</i>	12
2.2 <i>Podnebí a vodstvo</i>	16
2.3 <i>Půdní poměry, fauna, flóra a působení člověka</i>	25
3. Impaktní událost Siljan	38
3.1 <i>Historie výzkumu impaktního kráteru Siljan</i>	38
3.2 <i>Stáří impaktní události Siljan</i>	39
3.3 <i>Impaktor</i>	41
4. Povrchové tvary oblasti impaktního kráteru Siljan	43
4.1 <i>Geomorfologická charakteristika a hlavní etapy vývoje reliéfu</i>	43
4.2 <i>Relikty impaktní události Siljan</i>	54
5. Diskuze	67
6. Závěry	77
Seznam použité literatury	79
Seznam příloh	89

Seznam obrázků

Obr. 2.1 Poloha impaktního kráteru Siljan v rámci Švédska	12
Obr. 2.2 Zjednodušená geologická mapa okolí místa impaktního kráteru Siljan	13
Obr. 2.3 Vrstvy vápence Boda v bývalém vápencovém lomu Skålberget	14
Obr. 2.4 Stratigrafie hornin v okolí kráteru Siljan	15
Obr. 2.5 Zjednodušená stratigrafická tabulka okolí impaktního kráteru Siljan	16
Obr. 2.6 Průměrné teploty během roku na klimatické stanici v Borlänge a Östersund	17
Obr. 2.7 Průměrné teploty v meteorologické stanici Sveg	17
Obr. 2.8 Pozorované druhy srážek v Borlänge a Östersund	18
Obr. 2.9 Klimadiagram z meteorologické stanice Östersund	19
Obr. 2.10 Průměrný úhrn srážek na stanici Sveg	19
Obr. 2.11 Hloubka sněhu na stanici Östersund	20
Obr. 2.12 Průměrná relativní vlhkost vzduchu na stanicích Borlänge a Östersund	21
Obr. 2.13 Rychlost větru na meteorologické stanici v Borlänge	21
Obr. 2.14 Řeka Österdalälven	22
Obr. 2.15 Vodopád Styggforsen na řece Styggforsån	23
Obr. 2.16 Pláž tvořená tillem na ostrově Sollerön	24
Obr. 2.17 Mohyly s hroby Normanů na ostrově Sollerön	24
Obr. 2.18 Bezodtoké jezero Kungsholstjärnarna	25
Obr. 2.19 Vyvrácené stromy rodu Picea nedaleko vrcholu Hökberget	26
Obr. 2.20 Keře brusnice borůvky v lokalitě u vesnice Nord Selbäck	27
Obr. 2.21 Lišejníky, obrůstající bloky granitových hornin u osady Ingärtningsbodarna	27
Obr. 2.22 Exempláře houby druhu Boletus badius	28
Obr. 2.23 Mraveniště nedaleko jezera Bysjön	28
Obr. 2.24 Trus losa evropského nedaleko šterkového lomu Ingels	29
Obr. 2.25 Rak bahenní v jezeře Bysjön	30
Obr. 2.26 Mohyla Gravröse	30
Obr. 2.27 Tradiční veslice nazývaná kostelní loď	31
Obr. 2.28 Zbytky strusek z tavení železné rudy	31
Obr. 2.29 Opuštěná raně středověká osada nedaleko vrcholu Hökberget	32
Obr. 2.30 Bývalý vápencový lom Dalhalla	33
Obr. 2.31 Bývalý vápencový lom Solberga I	33
Obr. 2.32 Vápencový lom Osmundsberg	34
Obr. 2.33 Lom nedaleko města Ingels kde se těží šterk	34
Obr. 2.34 Springkällan	35
Obr. 2.35 Křesťanský kostel v Rättviku a v Bodě	36
Obr. 2.36 Socha v cíli Vasova běhu ve městě Mora	36

Obr. 3.1 Úlomky granitových hornin s tříštivými kužely	38
Obr. 3.2 Četnost impaktů meteoroidů do atmosféry Země	41
Obr. 4.1 Paleomapy rozsahu kontinentálního zalednění ve Skandinávii	44
Obr. 4.2 Meand jednoho z potoků severovýchodně od Rättviku	45
Obr. 4.3 Rozsáhlé glacifluviální akumulace v okolí Rättviku	46
Obr. 4.4 Eolické akumulace jemných písků u Rättviku	46
Obr. 4.5 Recentní delta na řece Österdalälven	47
Obr. 4.6 Pohled ze hřbetu jednoho z mnoha eskerů	48
Obr. 4.7 Stezka na výrazném hřbetu eskeru	48
Obr. 4.8 Jedno z mnoha glacifluviálních údolí	49
Obr. 4.9 Glaciální údolí Trollskuru	50
Obr. 4.10 Horní část skalního stupně vodopádu na řece Styggforsån	51
Obr. 4.11 Výrazné ledovcové ohlazy na bloku granitu typu Järna	52
Obr. 4.12 Skupina oblíků s ledovcovými ohlazy na hřbetu Knytberget	52
Obr. 4.13 Mapa lokalit s pozorovanými přímými impaktními relikt	54
Obr. 4.14 Impaktem natavené brekie v lokalitě Ingårninsbodarna	55
Obr. 4.15 Schéma tvarů obecného komplexního impaktního kráteru	57
Obr. 4.16 Tvar tříštivých kuželů	58
Obr. 4.17 Dokonale vyvinuté tříštivé kužele z impaktní události Haughton (Kanada)	58
Obr. 4.18 Lom na granitové horniny nedaleko městečka Färnäs	59
Obr. 4.19 Granitový lom Torrvål	60
Obr. 4.20 Úlomek granitové horniny s tříštivými kužely na lokalitě Slagkåglor	60
Obr. 4.21 Výrazné zlomy ve vápencových sedimentech v lomu Dalhalla	61
Obr. 4.22 Vertikální zvrstvení sedimentárních hornin způsobené impaktní událostí	62
Obr. 4.23 Pobřeží jezera Siljan nedaleko městečka Vikarbyn	62
Obr. 4.24 Pohled z okraje kráteru nad městem Rättvik	63
Obr. 4.25 Okolí impaktního kráteru Siljan v DEM	63
Obr. 4.26 Relativní výškový profil přes pozůstatek impaktního kráteru Siljan	64
Obr. 4.27 Mapa Bouguerových tíhových anomálií v oblasti impaktního kráteru Siljan	65
Obr. 4.28 Zobrazení magnetických anomálií v oblasti impaktní události Siljan	66
Obr. 5.1 Mohutný proud impaktní taveniny v kráteru Tycho	68
Obr. 5.2 Povrchové převýšení v měsíčním kráteru Tycho	69
Obr. 5.3 Pravděpodobná podoba impaktního kráteru Siljan	70
Obr. 5.4 Grafické znázornění navrhované metodiky odhadu denudace	71
Obr. 5.5 Topografická mapa kráteru Gale	72
Obr. 5.6 Hlavní geomorfologické rysy Impaktního kráteru Manicouagan v Kanadě	73
Obr. 5.7 Zobrazení Bouguerových tíhových anomálií impaktního kráteru Chicxulub	74

1. Úvod

1.1 Téma a cíle práce

Impaktní události jsou jako významný proces přetváření povrchu těles sluneční soustavy systematicky zkoumány až od minulého století. Kruhové prohlubně na povrchu Měsíce sice pozoroval už Galileo Galilei na začátku 17. století (Whitaker 1978), ale jejich pravá podstata zůstala neznámá takřka až do zahájení kosmických letů. V současné době je intenzivně studován jak význam planetek při vytváření planet a jejich měsíců, tak přímé a nepřímé důsledky velkých impaktních událostí na změny povrchu a celkového přírodního prostředí těchto těles. Impaktní krátery byly nalezeny v podstatě na všech tělesech sluneční soustavy, tvoří tak jeden z hlavních a zásadních procesů, které utváří povrchy těchto těles. Studium impaktních struktur však nezahrnuje jen tyto oblasti. Další význam impaktních událostí může být čistě ekonomický. Velké impaktní události narušují horninové podloží a jeho následný roztříštěný charakter může sloužit jako zóna, ze které se dají získávat různé druhy nerostného bohatství (Grieve a Masaitis 1994, Reimold et al. 2005b).

Povrch Země je před možnými katastrofickými účinky impaktních událostí zčásti chráněn atmosférou. Přesto však dochází k dopadům impaktorů na povrch planety poměrně často, vezmou-li se v úvahu velmi dlouhá časová měřítká geologické historie. Katalog impaktních kráterů na Zemi [1] uvádí více než 180 potvrzených impaktních událostí během historie Země a zcela jistě se jedná o velmi podhodnocené číslo, protože poměrně rychlé geologické pochody na planetě Zemi starší impaktní struktury z povrchu smazávají. Předpokládá se, že nejméně několik dalších stovek impaktních struktur čeká na své objevení (French 1998).

Předložená diplomová práce má přispět ke studiím o způsobech, rozsahu a intenzitě destrukce povrchových tvarů, které vznikly během impaktních událostí. Jako ukázkový příklad si vybírá největší komplexní impaktní kráter v Evropě – Siljan. Kráter Siljan ve středním Švédsku vznikl v pozdním devonu a pravděpodobně se významně podílel na jednom z pěti největších vymírání organismů na planetě Zemi (Goehring 2001, Reimold et al. 2005a, Dypvik et al. 2008). Hlavním výzkumným cílem diplomové práce bylo zjištění hlavních etap vývoje reliéfu v oblasti impaktního kráteru Siljan. Dále byly

zdůrazněny zachované geologické a geomorfologické relikty impaktu Siljan a diskutovány v širších souvislostech velkých impaktních událostí na Zemi a ve sluneční soustavě.

1.2 Metody výzkumu a postup prací

Pro vlastní práci byl vybrán impaktní kráter Siljan – největší dosud známá a prokázaná impaktní struktura v Evropě [1]. Během příprav prací byla studována převážně cizojazyčná odborná literatura zabývající se geologií, geomorfologií a paleogeografií studované lokality. Dále byl velký důraz kladen na studium problematiky impaktních kráterů, jejich genezi, morfologii, četnost a distribuci a to nejen na planetě Zemi ale i na dalších tělesech sluneční soustavy. Metodou rešerše, která byla kombinována s dokumentací terénních rekognoskací, byla vytvořena první část práce, zabývající se přírodním prostředím, tedy geologickým a geomorfologickým vývojem, hydrologií a klimatem a faunou a flórou oblasti kráteru.

Vlastní terénní práce ve zkoumaném území proběhly v srpnu a září 2014. Jejich základem byl geomorfologický průzkum lokality doplněný o dokumentaci zhodnocení antropogenních vlivů na původní reliéf a krajinu. Geomorfologický průzkum lze rozdělit na dvě části – *i) průzkum impaktních reliktních v lokalitě kráteru Siljan; ii) geomorfologický průzkum povrchových tvarů a struktur, které se v lokalitě kráteru Siljan a jejím blízkém okolí nacházejí.*

První část geomorfologického průzkumu lokality kráteru Siljan byla zaměřena především na lokalizaci a rekognoskaci struktur, tvarů a reliktních zachovaných po impaktní události v celé oblasti kráteru. Determinace impaktních reliktních byla podrobně nastudována před geomorfologickým průzkumem studiem odborné literatury, zabývající se impaktními událostmi a jejich dopady na prostředí postižené oblasti (např. French 1998, Shoemaker 1999, Hartmann 2005, Henkel a Aaro 2005 a další). Vzhledem k poměrně vysokému stáří impaktní události Siljan se průzkum zaměřil na impaktní relikty, které nejlépe odolávají erozním činitelům. Jednalo se především o tříštivé kužele, které se v postižené hornině mohou zachovat i více než miliardu let (Nicolaysen a Reimold 1999). Dále byly identifikovány impaktní relikty v podobě impaktních brekcií, zlomů v horninovém podloží vzniklých impaktní událostí, nebo reliktem kráterového lemu impaktního kráteru. Místa pro průzkum byla vybrána na základě dostupné literatury (např. Thorslund 1985, Kenkmann a Dalgwik 2000, Reimold et al. 2005a a další), která se

těmito relikty přímo nebo nepřímo zabývala, a geologických a geomorfologických mapových podkladů (viz např. příloha 1, 2 a 3). Dalším zdrojem unikátních informací (Jacobs 2014) o lokalitě impaktního kráteru Siljan byl pan Thomas Jacobs z geoparku Meteorum, který zná několik míst s impaktními relikty, jejichž dokumentace nebyla dosud publikována.

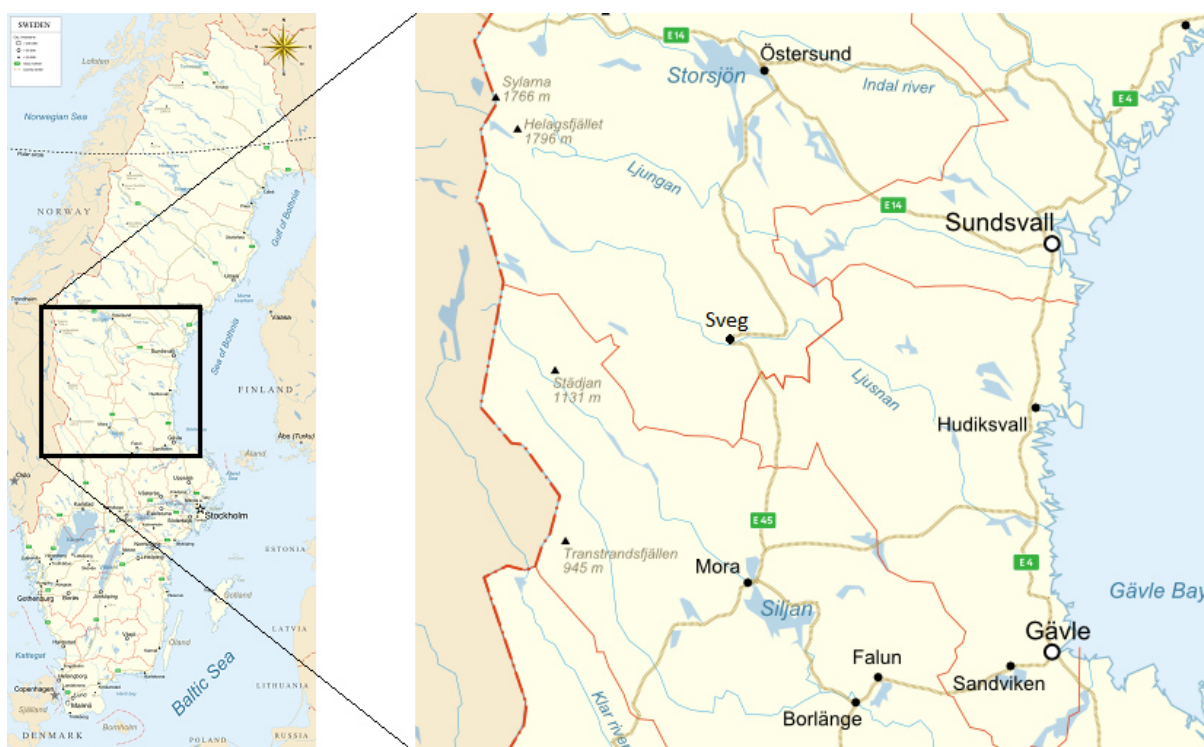
Druhá část geomorfologického průzkumu byla zaměřena na pozorování a dokumentaci vybraných geomorfologických tvarů a struktur různé geneze a stáří, které svědčí o reliéfových procesech v průběhu geologického vývoje. Hlavní pozornost byla věnována tvarům glaciálního a periglaciálního původu mladopleistocénního a holocénního stáří. Typické povrchové tvary byly cíleně vyhledávány po předchozím studiu mapových podkladů sledované oblasti. Následná interpretace získaných údajů byla základem pro stanovení hlavních etap vývoje reliéfu a především, společně s komparativní metodou za pomoci příkladů dalších kráterů, odhadu denudace, která v lokalitě impaktního kráteru Siljan proběhla od jeho vzniku. V diskuzi (kapitola 5) je také navržena metodika, která by mohla napomoci k dalšímu upřesnění odhadu mocnosti původních geologických struktur v této lokalitě.

K edičnímu zpracování literárních údajů a dokumentace je vhodné poznamenat, že citace literatury mají v předložené diplomové práci dvě varianty. Internetové zdroje jsou uvedeny čísla v hranatých závorkách a tištěné publikace jsou citovány klasickým způsobem.

2. Přírodní prostředí území impaktního kráteru Siljan

2.1 Geografická poloha, geologické a morfologické poměry

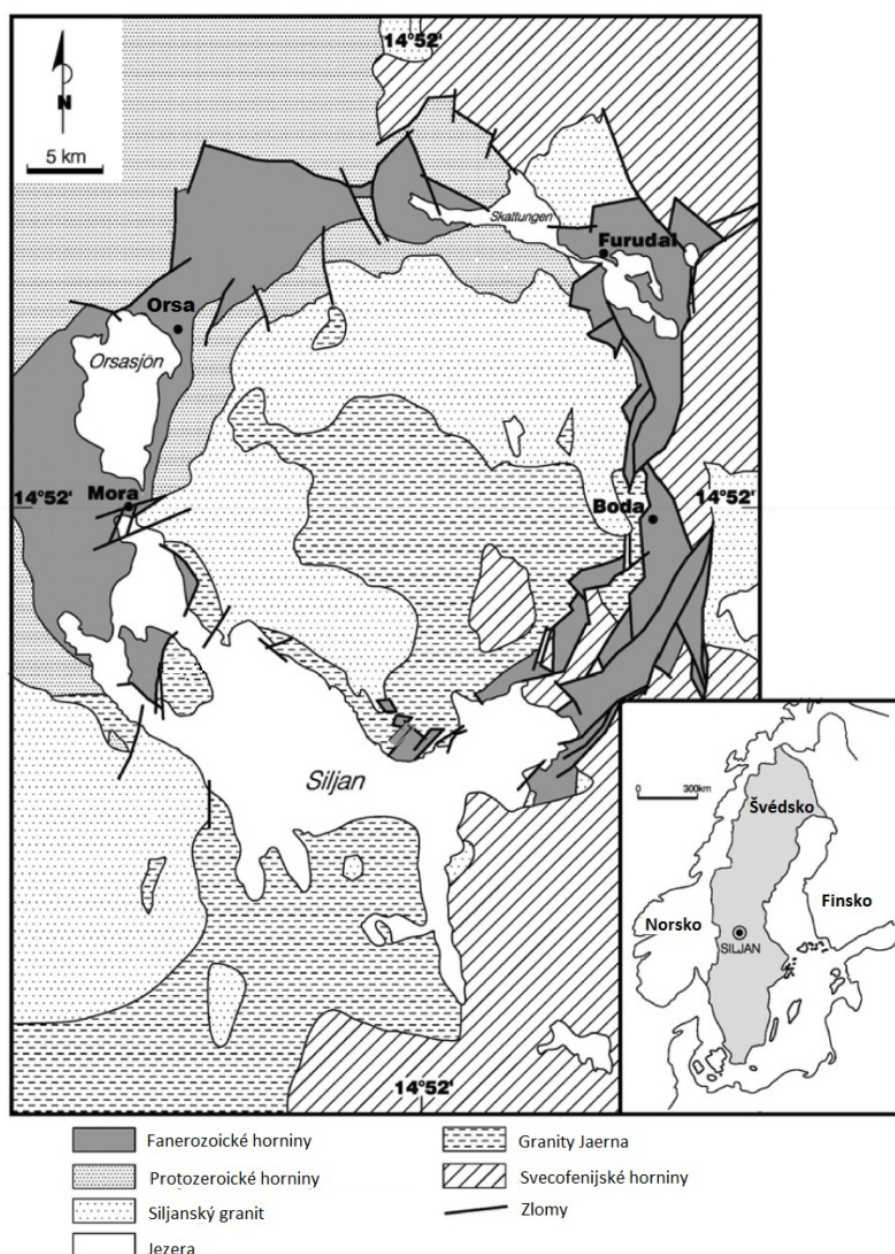
Střed impaktního kráteru Siljan se nachází přibližně na souřadnicích 61° 2' s. š., 14° 52' v. d. (obr. 2.1; [4]). Tento komplexní kráter leží v kraji Dalarna ve středním Švédsku a je nazýván podle jezera Siljan, které přibližně z jedné čtvrtiny vyplňuje kruhovitou depresi vzniklou impaktní událostí před 377×10^6 lety ([4], Reimold et. al 2005a). Celá oblast původního impaktního kráteru a jeho blízkého okolí leží na území čtyř mikroregionů, která zastřešují města Mora, Orsa, Leksand a Rättvik.



Obr. 2.1 Poloha impaktního kráteru Siljan v rámci Švédska. Ve zvětšeném výřezu jsou zobrazena i místa s meteorologickými stanicemi, která jsou uváděna v kapitole 2.3 (mapa upravena z [16]).

Celá oblast impaktní události leží na tzv. Fennoskandinávii. Fennoskandinávský štít je definován jako region prastarých hornin, především prekambriického stáří, ležící mezi skandinávskými Kaledonidy a Východoevropskou platformou (Ager 1980). Horninový základ v oblasti jezera Siljan vznikl přibližně před $1,8 \times 10^9$ lety (Ager 1980), tedy ve starším protozeroiku. Horninové podloží (obr. 2.2) tvoří především granity, které vznikly a zčásti byly i metamorfovány během Svecokalerianské orogeneze [2, 17]. Tyto granity patří pod tzv. Trans-skandinávský magmatický pás (Gaal a Gorbatshev 1987) a dělí se

především na granit typu Siljan a granit typu Järna (obr. 2.2). Pás granitů Siljan a Järna tvoří mohutný batolit, který se rozprostírá ještě dalších 300 km na severozápad (Gaal a Gorbatshev 1987). Horniny starší než 2×10^9 let (stáří odpovídající eonu Archean) jsou v okolí impaktní události vzácné, jen místy se nachází výchozy těchto starších granitů [17].



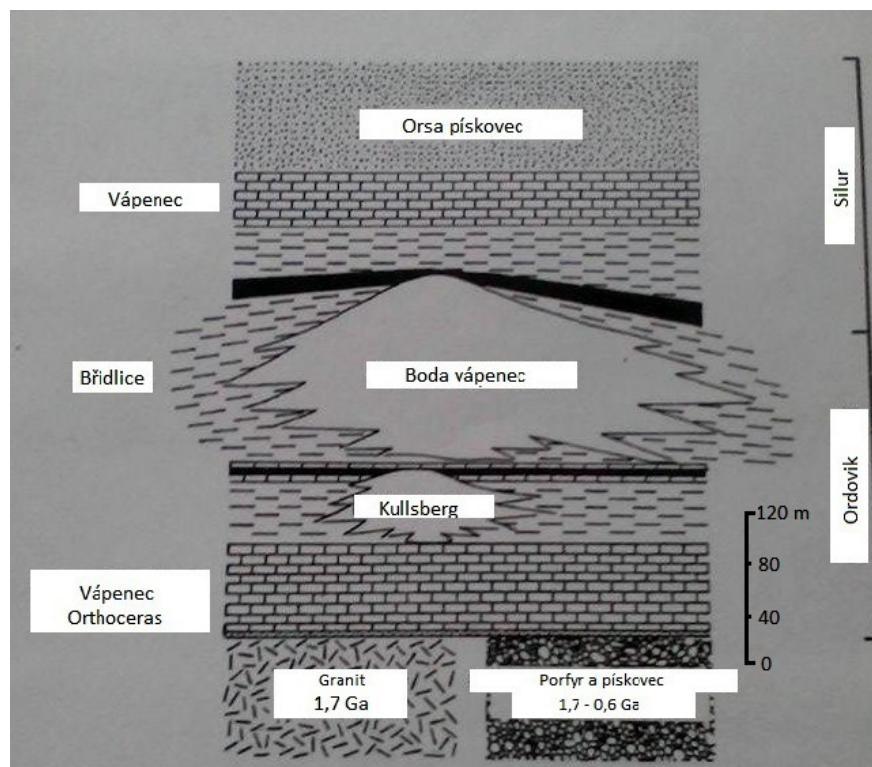
Obr. 2.2 Zjednodušená geologická mapa okolí místa impaktního kráteru Siljan a jeho polohou v rámci Skandinávie (upraveno dle Reimold et al. 2005a).

V prekambriu proběhlo ve Skandinávii několik orogenetických cyklů, ale všechna horská pásma byla exogenními činiteli v paleozoiku již zarovnána (Král 1999). Celý Baltský štít i s oblastí impaktní události Siljan měl tedy na počátku paleozoika ráz dokonale zarovnané paroviny a od konce paleozoika až dodnes je až na některé příbřežní části

souší. Oblast střední Skandinávie byla během paleozoika přibližně 100 milionů let (od středního kambria, ordoviku, siluru do devonu) zalita mělkým tropickým mořem a ležela v oblasti nedaleko rovníku (Brunsell 2005). V této době docházelo k biomechanickému vzniku vápenců, které vznikaly sedimentací nahromaděných ulit a skořápek mořských organismů (obr. 2.3; Thorslund 1985). Vyvíjela se i souvrství břidlic a pískovců. Ve studované oblasti jsou dodnes zachovány sedimentární horniny ze siluru a ordoviku, které se zde tvořily přibližně 90 milionů let (obr. 2.4; Thorslund 1985, Brunsell 2005).



Obr. 2.3 Fosiliferní vrstvy vápence Boda v bývalém vápencovém lomu Skålberget nedaleko města Backa. Takřka vertikální zvrstvení sedimentů nebylo způsobeno žádnou orogenezí, ale přímo impaktní událostí. Skålberget je geologicky unikátní místo, protože se zde nachází výchozy jak mladšího (pozdní ordovik) Boda vápence, tak i Kullsberg vápence (střední ordovik), které zde leží přímo na sobě, i přesto, že je časově dělí několik milionů let. Vápenec Boda je zde ve Skålbergetu plný endemických bezobratlých živočichů, kteří tu během ordoviku v mělkém teplém moři žili. Jedná se např. o různé druhy trilobitů, cefalopodů, brachiopodů a dalších (Brunsell 2005; foto M. Lulák).



Obr. 2.4 Stratigrafie hornin v okolí kráteru Siljan, které byly postižené samotným impaktem. Vápence, břidlice a pískovce se začaly tvořit na horninovém podloží paleoprotozeroického stáří. Vápence Boda a Kullsberg tvoří masivní biohermy, které se ve stratigrafii jeví jako robustní megačochky mezi ostatními více jílovitými vrstevnatými sedimenty. Obsahují mnoho fosilií, především Crinoidea, ale i dalších vymřelých organismů (upraveno dle Thorslund 1985 a Brunzell 2005).

Popsaná geologická lokalita v místě dopadu impaktoru je unikátní zachováním těchto sedimentárních hornin právě z důvodu impaktní události. Thorslund (1985) a Brunzell (2005) uvádějí, že impakt koncem devonu pohřbil souvrství těchto sedimentů hluboko pod tehdejší povrch a tím je uchránil před denudačními procesy. Zbytek Baltského štítu nebyl před exogenními procesy od konce paleozoika ničím chráněn a proto se sedimentární horniny z ordoviku a siluru nikde jinde v takovém množství nezachovaly.

Od konce devonu, kdy doznívalo kaledonské vrásnění, až do kvartéru byla celá oblast Baltského štítu vystavena denudačním procesům. Proto na jeho povrchu převládaly destrukční tvary nad akumulacími a významnou část povrchu tvoří peneplény (Král 1999).

Kvartérní období je další paleogeograficky významnou etapou vývoje přírodního prostředí oblasti Siljan (obr. 2.5). Během pleistocenního ochlazení podnebí došlo na Baltském štítu ke vzniku ledovců, které postupně vytvořily souvislý kontinentální ledoec,

který pokryl oblast (nejen) celé Skandinávie. Glacigenní procesy a jevy proto výrazně ovlivnily charakter povrchových tvarů i v oblasti paleozoického impaktního kráteru Siljan.

Stáří		Událost	Litologie
Kvartér		Zalednění	Till
Paleozoikum	Devon	Impakt Siljan 377 Ma	Impaktní taveniny a brekcie
	Silur		Pískovec
			Vápenec a prachovec
	Ordovik		Vápenec a břidlice
			Vápenec
		Hiát	
Protozeroikum	Neo		Mafické žíly
			Pískovec
		Hiát	
	Meso		Vulkanity bohaté na živce a křemen
			Intrusivní vulkanity
		Svecofenijská orogeneze	
			Rula

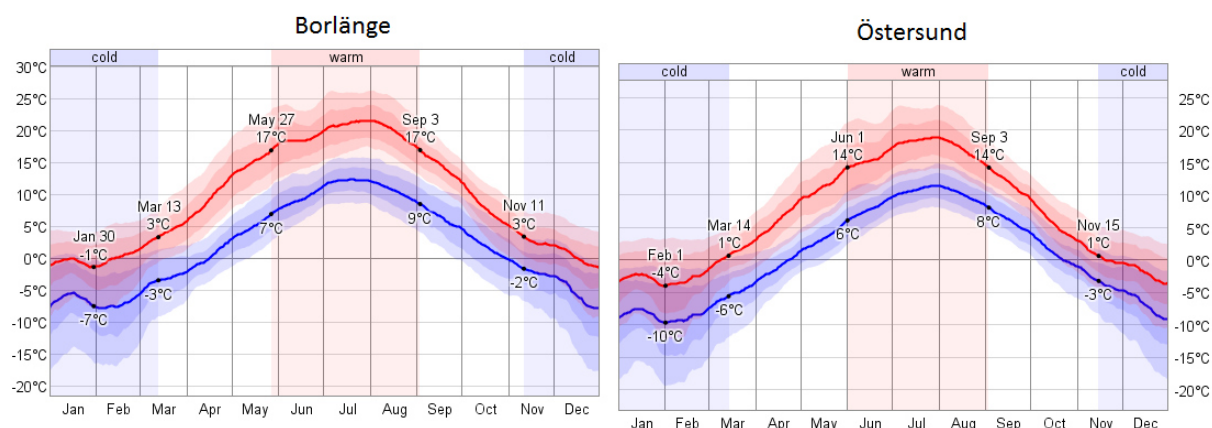
Obr. 2.5 Zjednodušená stratigrafická tabulka okolí impaktního kráteru Siljan s hlavními událostmi, které vytvářely místní reliéf (upraveno dle Henkel a Aaro 2005).

Výrazná většina glacigenních tvarů akumulárních (např. drumliny), či abrazivních (oblíky, ledovcové ohlazy), má tvar protažený ve směru pohybu původního kontinentálního ledovce, tj. od severozápadu k jihovýchodu (Ulfstedt 1982, Yrgård 1982). Tlak, kterým pevninský ledovec působil na své podloží, způsobil, že se velká část Skandinávie ocitla i pod úrovní tehdejší hladiny oceánů. Naopak od konce pleistocénu až do současnosti dochází k postupnému epeirogenetickému (izostatickému) zdvihu celé oblasti, místy až 8 mm.rok^{-1} (Lindén 2006). Tektonicky je ale oblast velice klidná. V okruhu 100 km od okraje impaktního kráteru za posledních 15 let proběhlo pouze jedno zemětřesení větší než M 2 (M 4,6) a to v září 2014 asi 60 km severně od města Mora [9].

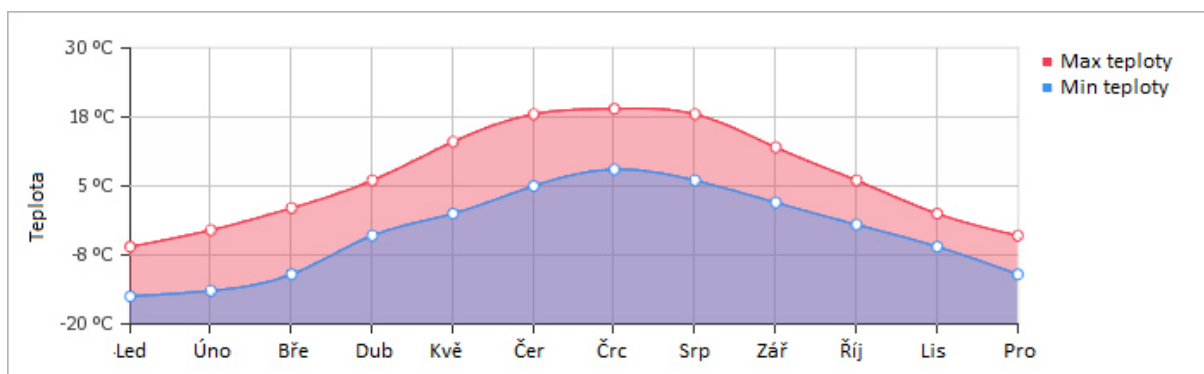
2.2 Podnebí a vodstvo

Oblast Siljanského impaktního kráteru leží na rozhraní klimatických pásem Dfb (vlhké kontinentální podnebí) a Dfc (subpolární podnebí) dle Köppenovy klasifikace podnebí (Peel et al. 2007). V lokalitě Siljan není umístěna žádná meteorologická stanice s volně dostupnými daty. Z tohoto důvodu jsou uváděny meteorologické údaje ze tří míst, které Siljanu leží nejbližší. Jedná se o Borlänge, ležící asi 60 km jihovýchodně, dále pak

Sveg a Östersund, ležící přibližně 150 km respektive 300 km severně od Siljanu (obr. 2.1). Nejbližší oblasti, kterou se tato práce zabývá, se nachází klimatická stanice na letišti Borlänge [3]. Teploty vzduchu v této oblasti během roku kolísají mezi $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ (obr. 2.6 vlevo), zřídka se dostávají pod $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, či nad $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ [3]. Östersund ležící v klimatické zóně Dfc, má průměrné teploty vzduchu nižší (obr. 2.6 vpravo, [7]), stejně tak stanice ve Svegu (obr. 2.7). Je pravděpodobné, že teplotní podmínky v oblasti impaktního kráteru Siljan jsou na rozhraní mezi těmito dvěma (Borlänge a Östersund) klimatickými stanicemi.



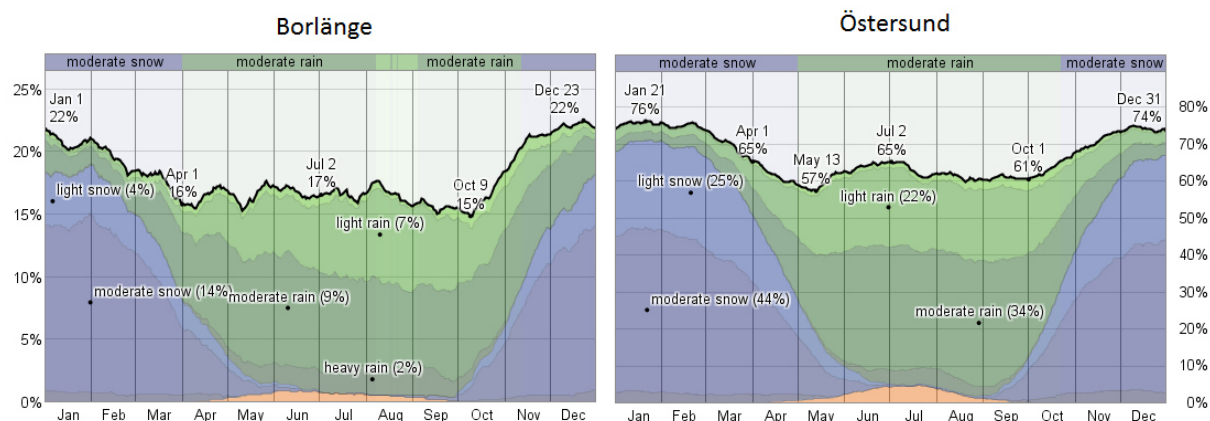
Obr. 2.6 Průměrné denní (červená linie) a noční (modrá linie) teploty během roku na klimatické stanici v Borlänge (vlevo). Vnitřní rozhraní sytější barvy značí percentil mezi 25 a 75, vnější rozhraní slabší barvou percentil mezi 10 a 90. Vpravo je pro porovnání situace ze stanice Östersund, která již leží v zóně Dfc, přibližně 300 km severně od Siljanu ([3, 7]; WeatherSpark).



Obr. 2.7 Průměrné maximální (červeně) a minimální (modře) teploty v meteorologické stanici Sveg ([6]; World Weather & Climate Information).

Srážky na stanici Borlänge nejsou časté, i přesto, že leží v klimatickém pásmu Dfb. Pravděpodobnost srážek kolísá mezi 15 % okolo 9. října každého roku až k 22 % okolo 23. prosince (obr. 2.8 vlevo, [3]). Stanice Östersund má zcela odlišný charakter rozdělení srážek. Dokonce i v den, kdy je nejmenší pravděpodobnost srážek (13. květen), je tato

pravděpodobnost mnohem vyšší, než nejvyšší v Borlänge, a to 57 % [7]. Statisticky nejčastěji srážky padají v této stanici 21. ledna (obr. 2.8 vpravo, [7]).



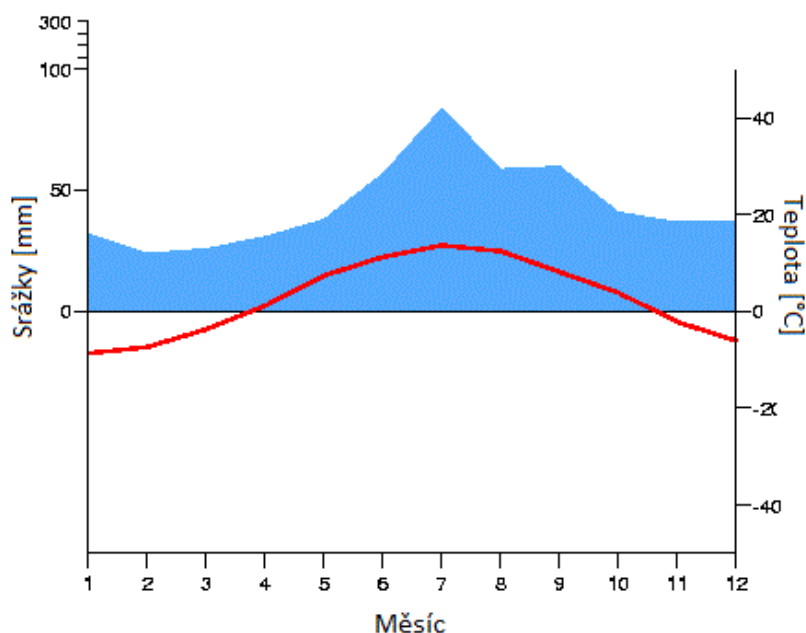
Obr. 2.8 Pozorované druhy srážek během roku a jejich pravděpodobnost pro Borlänge (vlevo) a Östersund (vpravo). Pokud jsou během jednoho dne pozorovány dva různé druhy srážek, např. lehký déšť a bouřka, je pro tento den počítán závažnější druh srážek, tedy bouřka. Zeleně jsou zobrazeny druhy dešťových srážek (nejlehčí nejvýše), modře sněhových srážek. Bouřky jsou zobrazeny růžovou barvou ([3, 7]; Weather Spark Beta).

Celkové průměrné množství srážek v oblasti Siljanu se pochybuje kolem 560 mm za rok, což odpovídá spíše klimatické zóně Dfc. Jak už bylo řečeno výše, oblast se nachází na rozhraní mezi Dfb a Dfc. Zatímco Dfb nemá výraznější vlhčí sezonalitu, Dfc jí má v průběhu léta, což je charakteristické i pro sledovanou oblast u jezera Siljan (obr. 2.9, 2.10, [5]).

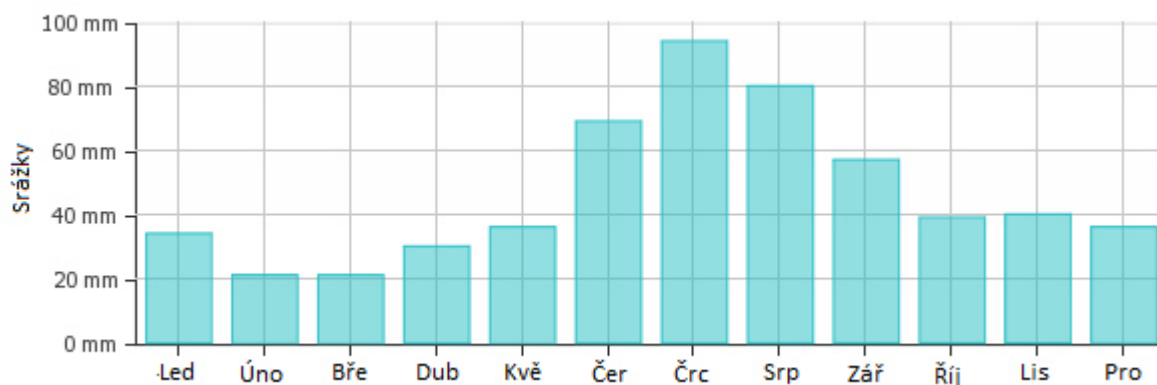
Oestersund
366 m

526 mm

Dfc



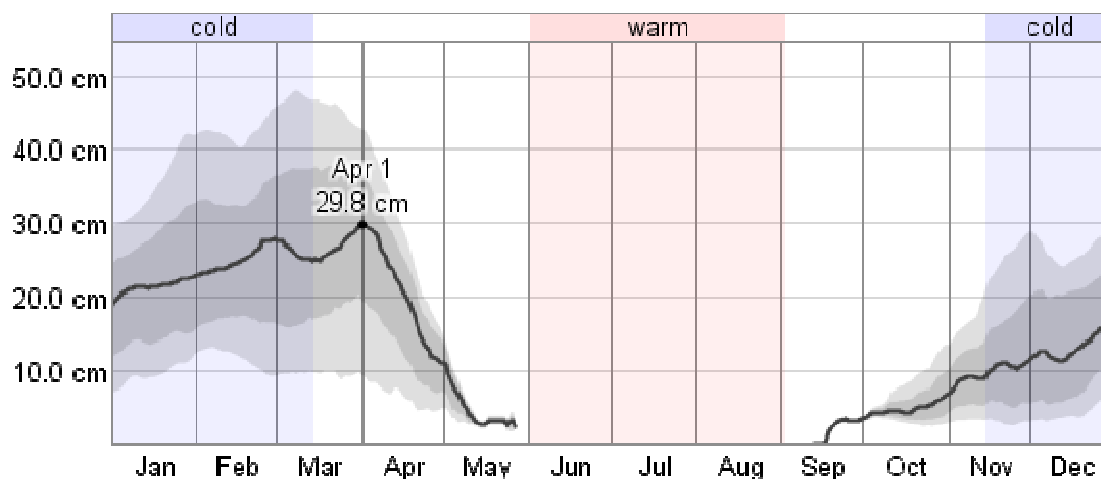
Obr. 2.9 Klimadiagram z meteorologické stanice Östersund. Modrá plocha zobrazuje průměrný úhrn srážek, červená křivka průměrnou teplotu během roku. Z obrázku je patrné, že rozdílná geografická poloha od meteorologické stanice Borlänge (Östersund je od středu kráteru Siljan vzdálen přibližně 300 km severně) způsobuje, že průměrné roční teploty jsou nižší. Östersund, na rozdíl od Borlänge, již leží v klimatickém pásu Dfc, má tedy výraznější vlhčí období přes léto. Tato situace odpovídá i oblasti impaktního kráteru Siljan ([3, 5]; Klimadiagramme Weltweit).



Obr. 2.10 Průměrný úhrn srážek na stanici Sveg v průběhu roku. Sveg se nachází přibližně v polovině mezi stanicí Borlänge a Östersund, Celkový průměrný úhrn srážek je zde téměř stejný (cca 560 mm.rok⁻¹), jako na stanici Östersund (obr. 2.9) a také jejich rozdělení během roku je podobné ([6]; World Weather & Climate Information).

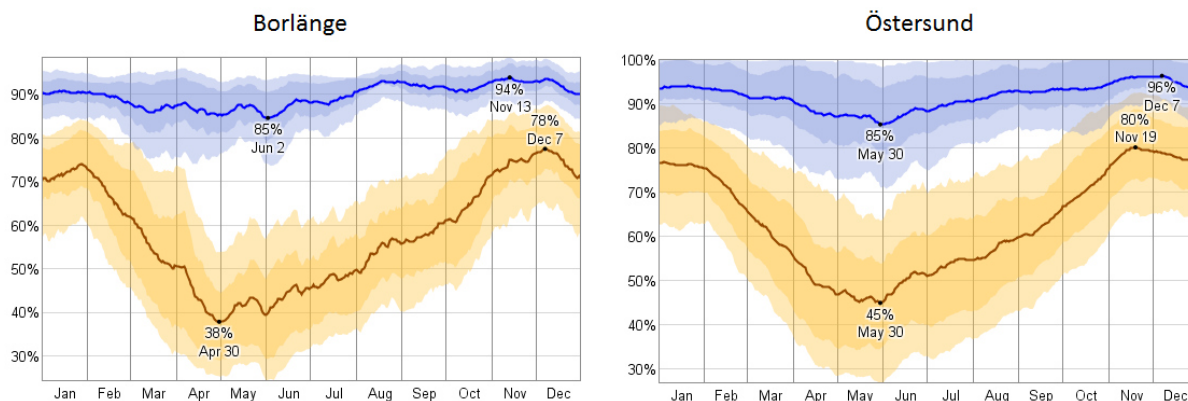
Pravděpodobnost, že spadnou sněhové srážky na stanicích Borlänge a Östersund, se výrazně liší. Zatímco v Borlänge je nejvyšší 31. ledna (19 %), na stanici v Östersundu je to 71 % 25. ledna [3], [7]. Sezóna, kdy je nejvyšší pravděpodobnost, že nějaké sněhové

srážky spadnou, je pro letiště v Borlänge od 3. listopadu do 14. dubna [3]. V Östersundu je sezóna o něco delší – 15. říjen až 6. květen [7]. Na letišti v Borlänge se navíc sněhové srážky v podstatě neudrží, rychle mizí a měření mocnosti sněhové pokrývky je tak obtížné [3]. Tato situace však neodpovídá oblasti okolo jezera Siljan, kde se každoročně konají závody na sjezdových i klasických lyžích. Klimatická situace na stanici Östersund je jiná. Nejvyšší mocnost sněhové pokrývky je zde 1. dubna (obr. 2.11) a odpovídá 29,8 cm [7].



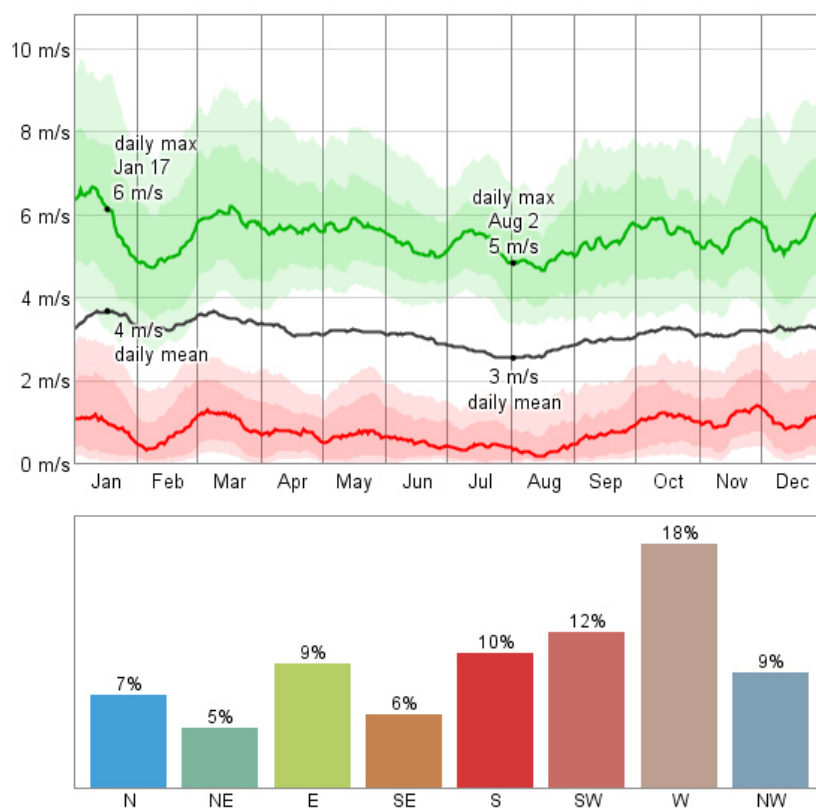
Obr. 2.11 Hloubka sněhu na stanici Östersund přibližně 300 km severně od jezera Siljan. Nejvyšší mocnost sněhové pokrývky je mediánově (černá linie) 1. dubna a odpovídá hodnotě 29,8 cm. Tmavě šedá plocha odpovídá percentilu mezi 25 až 75, světle šedá 10 až 90 ([7]; Weather Spark Beta).

Relativní vlhkost vzduchu se v Borlänge kolísá v průběhu roku mezi 38 – 94 %. Jen málokdy je nižší než 24 % nebo vyšší než 99 %. Nejsušší vzduch je v průměru okolo 30. dubna, kdy je 45% vlhkost, zatímco 13. listopadu dosahuje až 92 % [3]. Östersund má vlhčí klima jak srážkově, tak i vlhkostně (obr. 2.12). Typický rozsah vlhkosti vzduchu leží mezi 45 % až 96 %, jen občas je nižší než 27 %, ale může dosáhnout i 100% vlhkosti. Okolo 30. května je vzduch v průměru nejsušší (54% vlhkost), nejvíce vlhko je okolo 7. prosince, kdy relativní vlhkost vzduchu v průměru dosahuje až 93 % [7]. Klimatická situace u jezera Siljan může být charakterizována jako přechodná oblast mezi těmito dvěma stanicemi.



Obr. 2.12 Průměrná (linie) denní relativní vlhkost vzduchu na stanicích Borlänge (vlevo) a Östersund. Oranžová plocha odpovídá denním minimům, zatímco modrá denním maximům. Tmavší barva reprezentuje percentil mezi 25 až 75, světlejší 10 až 90 ([3, 7]; Weather Spark Beta).

Větrné podmínky jsou velmi lokální záležitost závislá především na reliéfu. Proto bude brána v potaz pouze situace na letišti v Borlänge, které je blíže jezeru Siljan. V průměru zde rychlost větru dosahuje hodnot mezi $0 - 7 \text{ ms}^{-1}$, přičemž zřídka přesahuje 10 ms^{-1} [3]. V Borlänge nejčastěji vane vítr od západu a jeho síla je nejvyšší na přelomu roku (obr. 2.13; [3]).

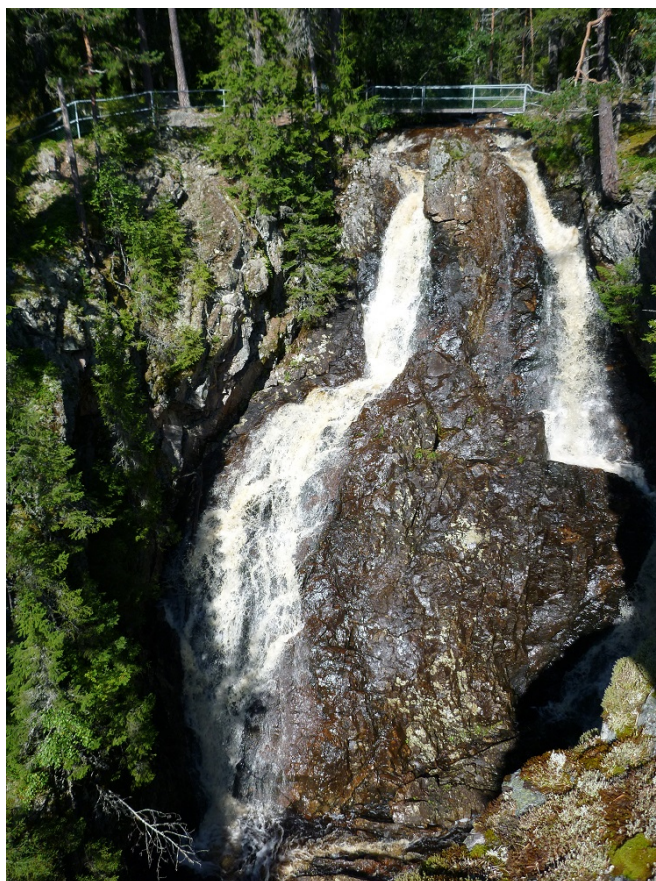


Obr. 2.13 Nahoře je znázorněna v grafu průměrná denní nejvyšší (zelená), střední (černá) a nejnižší (červená) rychlost větru na meteorologické stanici v Borlänge. Tmavší plochy odpovídají percentilu 25 až 75, světlejší 10 až 90. Obrázek dole zachycuje směr převládajícího proudění v průběhu celého roku. Nejčastěji vítr vane od západu – 18 % případů a to především v zimě ([3]; Weather Spark Beta).

Klimatické podmínky a málo propustné až nepropustné skalní podloží způsobují, že je říční síť v oblasti Siljanu, podobně jako ve velké části celé Skandinávie, poměrně hustá a dostatečně zásobená vodou. Vyskytuje se zde i velké množství jezer, močálů a rašelinišť (Král 1999). Na rozdíl od zbytku Evropy je říční síť Skandinávie velmi mladá, protože se začala vyvíjet až po ústupu kontinentálního ledovce od začátku holocénu, tedy v posledních cca 10 000 letech. Relativní mládí říční sítě je jedním z důvodů, že zde řeky mají nevyrovnaný spád a tvoří často peřeje a vodopády (obr. 2.14 a 2.15). Řeky v okolí jezera Siljan mají autochtonní charakter a smíšené niválně dešťové napájení s nejvyššími průtoky na jaře a v létě.



Obr. 2.14 Řeka Österdalälven, dlouhá 300 km, protéká jezerem Siljan. Několik km před ústím do Siljanu vytváří v přírodní rezervaci Alderängarna peřeje. Po překonání Siljanu se spojuje u města Djurås s řekou Västerdalälven, kde spolu vytváří řeku Dalälven, která ústí do Botnického zálivu (foto M. Lulák).



Obr. 2.15 Vodopád Styggforsen na řece Styggforsån je vysoký 36 m (6. nejvyšší ve Švédsku). Přírodní rezervace okolo tohoto vodopádu unikátně spojuje dva nejvýznamnější geologické procesy, které vytvořily reliéf místního přírodního prostředí. Úzké údolí bylo vytvářeno ledovcovým proudem během poslední deglaciace na začátku holocénu. Skalní podloží zde tvoří paleozoické sedimenty, které impaktní událost posunula do vertikální pozice a navíc otočila. Nejmladší pískovce Orsa se zde přímo stýkají se starým paleoprotozeroickým granitovým podložím (Brunsell 2005; foto M. Lulák).

Oblast impaktní události Siljan je stejně jako značná část Skandinávie velmi bohatá na jezera. Samotné jezero Siljan, které má rozlohu 290 km², vzniklo v paleozoické tektonické depresi po impaktní události jako důsledek glaciálních a glacialakustrinních procesů v mladším kvartéru. V současné době se jedná pouze o relikt mnohem většího jezera, které bylo před cca 9000 lety spojeno s Baltským mořem (Thorslund 1985). Jezerem Siljan protéká řeka Österdalälven (obr. 2.14), která náleží do úmoří Baltského moře. Na tomto jezeře se nachází několik ostrovů. Největší z nich je Sollerön (obr. 2.16) s rozlohou 22,25 km², na němž byly nalezeny bohaté hroby normanských válečníků a vládců z doby na přelomu prvního tisíciletí n. l. ([10]; obr. 2.17).



Obr. 2.16 Pláž tvořená tillem na ostrově Sollerön s pohledem přes jezero Siljan východním směrem. Na horizontu je vidět zvýšený okraj impaktního kráteru (foto M. Lulák).



Obr. 2.17 Mohyly s hroby Normanů na ostrově Sollerön. Převážná většina pokladů nalezená v těchto hrobech je nyní ve sbírkách Národního muzea ve Stockholmu (foto M. Lulák).

Jezero Siljan není jediné, které vyplňuje depresi vzniklou impaktní událostí. Siljan je na severu spojen průlivem s dalším jezerem Orsasjön (53 km²). Obě jezera mají současnou nadmořskou výšku hladiny 162 m n. m (Henkel a Aaro 2005). Dohromady vyplňují přibližně polovinu obvodu celého impaktního kráteru. Na severovýchodní straně kráterové deprese leží dvě další velká jezera – Skattungen a Oresjön. Impaktní kráter Siljan je tedy po svém obvodu vyplněn takřka ze tří čtvrtin vodními plochami.

V jihozápadní části impaktního kráteru se nachází dvě malá jezera Kungsholstjärnarna vzniklá termokrasovými procesy (Ulfstedt 1982, Brunsell 2005, obr. 2.18). Ledovcové splazy, které v jedné z ústupových fází kontinentálního ledovce proudily touto oblastí, zde vytvořily ledovcové čočky s uvězněnými bloky ledu. Po roztátí těchto ledových bloků se vrstvy glacigenních sedimentů mírně propadly a vznikly tak

pánve bezodtokých jezer. Obě jezera Kungsholstjärnarna nemají žádný přítok ani odtok a zavodnění získávají z dešťových a sněhových srážek a z podzemní zóny saturace (Ulfstedt 1982, Brunsell 2005).



Obr. 2.18 Bezodtoké jezero Kungsholstjärnarna vzniklé termokrasovými procesy v jihovýchodní části deprese kráteru Siljan. Ledovcový proud se zde pohyboval (ve směru fotografického záběru) od severozápadu k jihovýchodu (foto M. Lulák).

V oblasti Siljanského kráteru se nenachází pouze vodní plochy přírodního původu. Na řece Österdalälven (obr. 2.14) přibližně 10 km severozápadně od města Mory leží umělá vodní nádrž Spjutmosjön, která má rozlohu přibližně 5 km².

2.3 Půdní poměry, fauna, flóra a působení člověka

V oblasti impaktního kráteru Siljan podobně jako ve většině Skandinávie převládají půdy, které se v typologii řadí pod podzoly [14]. Na půdní podmínky se váže i místní rostlinstvo. Celá oblast patří fytogeograficky do eurosibiřské podoblasti Holoarktidy (Král 1999) a vegetačního pásu boreálních jehličnatých lesů (tajgy). Vzhledem k nedávnému zalednění je fauna i flóra v této oblasti poměrně chudá. Druhového složení lesů v okolí Siljanské impaktní události dominují dva jehličnaté stromy (obr. 2.19) a to borovice lesní (*Pinus silvestris*) a smrk ztepilý (*Picea abies*). Jehličnaté stromy (smrky

především) dávají přednost kyselým podzolovitým půdám, které se tak dále vyvíjejí, protože jehličnatý detrit podzoly okyseluje. Listnatým stromům nejvíce dominují hojně přítomné stromy rodu *Betula* (bříza; obr. 2.20), a to především bělokorá (*pendula*).



Obr. 2.19 Vyvrácené stromy rodu *Picea* nedaleko vrcholu Hökberget ležící podél trasy lyžařského závodu Vasaloppet (Vasova běhu). Stromy rodu *Picea* podléhají vývrátům na místech s prudkými poryvy větru a to i kvůli mělce rostlému kořenovému systému. Těmito vývraty stromů dochází k pedoturbaci, což napomáhá k vyšší ekologické diverzitě (foto M. Lulák).

Kyselé půdní prostředí preferují i další rostliny, které jsou v oblasti impaktního kráteru hojné. Jedná se především o keře brusnice borůvky a brusnice brusinky (*Vaccinium myrtillus* respektive *Vaccinium vitis-idaea*; obr. 2.20). Sledovaná oblast je také velmi vlhká, takže jsou zde hojně rozšířeny i různé mechy a lišejníky (obr. 2.21), které na zemi tvoří podmáčené koberce. Další organismy, kterým vlhké prostředí vyhovuje, jsou houby. Švédové, např. na rozdíl od Čechů, aktivně jedlé houby nevyhledávají (obr. 2.22), a také proto je jejich množství v místních lesích oproti českým zemím výrazně vyšší.



Obr. 2.20 Keře brusnice borůvky v lokalitě u vesnice Nord Selbäck. Keřiky prorůstá i bříza bělokorá a borovice lesní. Nepatrná prohlubeň uprostřed je pozůstatek příkopové pasti na losy evropské, které místní lidé tímto způsobem lovili po stovky let. Los se v pasti zasekl nohama u sebe a nemohl se hýbat a lovcem byl následně zabít. Příkopy tvořily desítky metrů dlouhé překážky a losi byli tímto způsobem takřka vyhubeni, dokud tento způsob lovu nebyl v roce 1865 zakázán (foto M. Lulák).



Obr. 2.21 Hojné výrazně bíle zbarvené lišejníky, obrůstající bloky granitových hornin rozpadlých periglaciálními procesy, nedaleko osady Ingårninsbodarna. Jedná se např. o druhy *Cladonia stellaris*, *Cladonia arbuscula* a další (foto M. Lulák).



Obr. 2.22 Tři mohutné exempláře houby druhu *Boletus badius* (hřib hnědý) rostoucí přímo na turistické pěšině nedaleko vodní nádrže Spjutmosjön. Mobilní telefon je přiložený jako měřítko (foto M. Lulák).

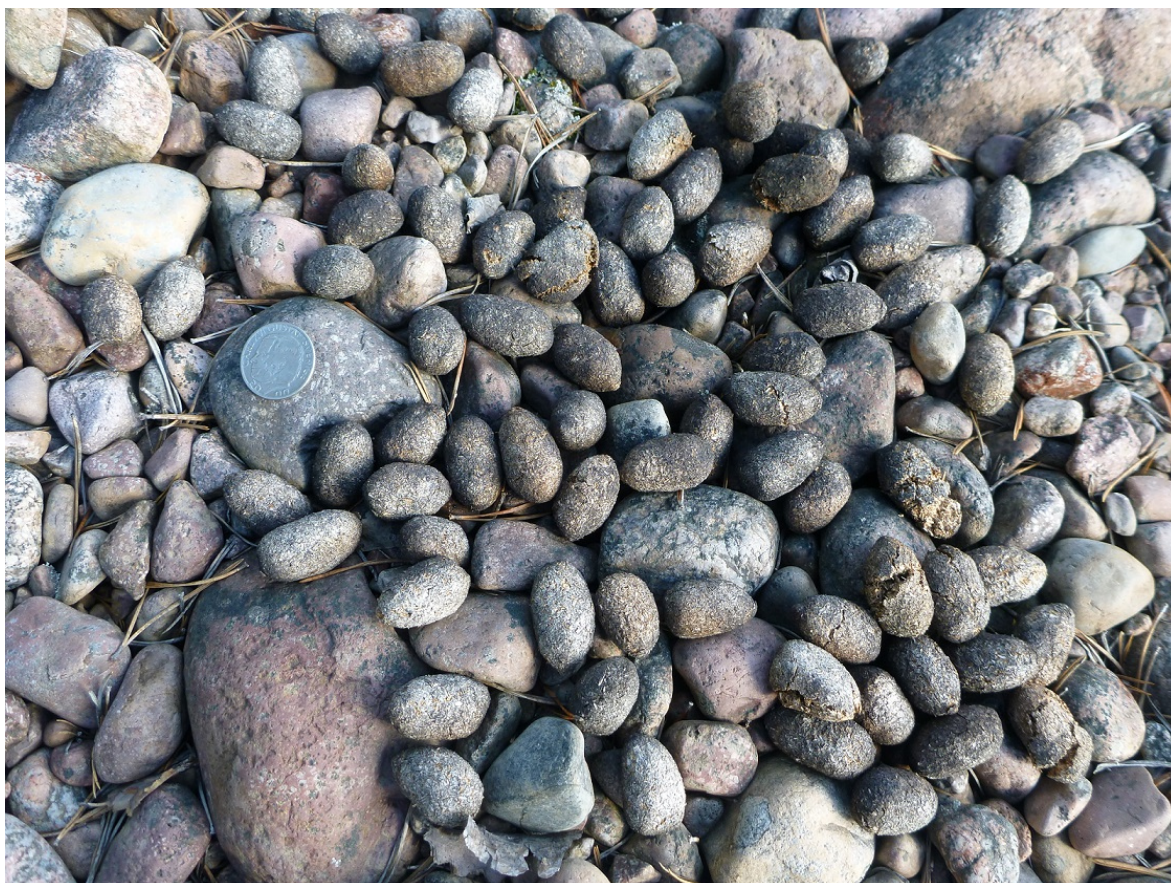
Pravděpodobně nejlépe pozorovatelným zástupcem makroskopické fauny je jeden z jeho nejmenších zástupců a to mravenec lesní (*Formica rufa*). Dobře pozorovatelná jsou především jeho obydlí ve formě kopulovitých mravenišť (obr. 2.23), ke kterým často vedou vyšlapané cestičky od mravenců shánějících potravu a stavební materiál.



Obr. 2.23 Přibližně jeden metr vysoké mraveniště nedaleko jezera Bysjön. Lesy v okolí impaktní události Siljan jsou plné takovýchto mravenišť, která zde mohou být až 1,5 m vysoká (foto M. Lulák).

Vetší fauna je v lokalitě impaktního kráteru Siljan zastoupena především býložravými losy evropskými (*Alces alces*; obr. 2.20, 2.24), největšími zástupci jelenovitých v Evropě. Často lze také zaslechnout štěkot menších zástupců jelenovitých – srnců

obecných (*Capreolus capreolus*). Jako zástupce omnivorů se zde vyskytuje např. medvěd hnědý (*Ursus arctos*). Hojně zastoupená zde je i fauna v podobě ptáků. Husté lesy snižují naději na jejich přímé pozorování, lze je však sledovat aspoň akusticky (především datlovité), případně lze často narazit na známky jejich výskytu v podobě vývržků – nestavitelných zbytků potravy.



Obr. 2.24 Trus losa evropského nalezený nedaleko štěrkového lomu Ingels. I přesto, že je los evropský obrovské zvíře, je jeho pozorování obtížné, protože je plachý. Přiložená mince (1 SEK) slouží jako měřítko (foto M. Lulák).

Místní vodní fauna je vzhledem k rozlehlým vodním plochám a mnoha řekám zastoupena velmi početně. Mezi nejzajímavější zástupce patří pravděpodobně ryba druhu *Myoxocephalus quadricornis*, která je původem marinní a hojně se vyskytuje např. v Baltském moři a Severním ledovém oceánu [15]. Protože jezero Siljan bylo podle kvartérně geologických pozůstatků ještě nedávno propojeno s Baltským mořem (Thorslund 1985), zachovala se malá populace těchto ryb i zde. Žijí v nejhlubších částech jezera Siljan a Orsasjön, kde je voda dostatečně chladná [15]. V místních jezerech je mimo ryb také možné pozorovat např. raky (obr. 2.25).



Obr. 2.25 Rak bahenní (Astacus leptodactylus) pozorovaný v jezeře Bysjön (foto M. Lulák).

Člověk se poprvé na území okolo impaktního kráteru Siljan, dostal přibližně před 6000 lety [10]. Přítomnost člověka z této doby dokazují nálezy na ostrově Sollederön, kde byly nalezeny kamenné nástroje (např. nůž na stahování kůže) staré právě přibližně 6000 let. Jednalo se o malé skupinky (až 25 osob) lovců a sběračů, které přírodní prostředí ovlivňovaly nepatrně. Větší vliv na okolní prostředí začal mít člověk v době bronzové (před 3500 – 2500 lety), kdy začal budovat pohřební mohyly (obr. 2.26), především okolo vodních ploch a na vrcholcích hor. Jednalo se o hroby bojovníků a dalších významných lidí.



Obr. 2.26 Gravröse – jedna z mnoha mohyl (starých pohřebišť z doby bronzové), nacházejících se okolo vodních cest a ploch ve středním Švédsku. Tato mohyla leží přímo na pobřeží jezera Siljan asi 6 km jižně od města Rättvik (foto M. Lulák).

Vodní plochy a cesty začaly být ještě více důležité v době železné. Z bažin a jezer v oblasti okolo Siljanu lidé získávali železnou rudu, kterou poté zpracovávali nebo prodávali dál (a významné obchodní stezky tvořily právě vodní cesty [10]; obr. 2.27).



Obr. 2.27 Tradiční veslice nazývaná kostelní loď, používaná jako dopravní prostředek po jezeru Siljan už od dob Vikingů. S příchodem moderních dopravních prostředků v průběhu 20. století tento tradiční způsob takřka zanikl. Obyvatelé Rättviku však chtěli tuto tradici zachovat a v roce 1941 si objednali výrobu dalších několika lodí od posledního žijícího loďaře, který znal technologický postup výroby. Dodnes probíhají mimo jiné i závody těchto veslic na jezeře Siljan (Jacobs 2014; foto M. Lulák).

V době železné se lidé také naučili využívat místní unikátně zachované vápencové horniny paleozoického stáří. Při tavení železné rudy taveninu mísili s vápencem (obr. 2.28), který na sebe navázal nečistoty a místní řemeslníci tak získávali čistší železo, ze kterého vyráběli velmi kvalitní zbraně a nástroje. Příklady těchto zbraní, nástrojů a šperků byly v obrovském množství nalezeny na ostrově Sollerön, kde se až do minulého století zachovalo mnoho nevykradených hrobů významných vládců a bojovníků (obr. 2.17; [10]). Pozůstatky raně středověkého osídlení byly nalezeny také nedaleko Mory pod kopcem Hökberget (obr. 2.29).



Obr. 2.28 Zbytky z tavení železné rudy na příkladu strusek, nalezených v okolí jezera Siljan (levý obrázek z místa nedaleko vápencového lomu Skålberget, pravý z pobřeží Siljanu u města Rättvik). Struska na levém obrázku je pravděpodobně stará několik stovek let (foto M. Lulák).



Obr. 2.29 Opuštěná raně středověká osada nedaleko vrcholu Hökberget ležící podél trasy lyžařského závodu Vasaloppet. Švédové mají pro podobné případy termín Ödesböle, což značí osídlení, které bylo v minulosti opuštěno. Pylovými analýzami v blízkém okolí bylo zjištěno, že osídlení bylo založeno mezi lety 900 – 1100 n. l. a opuštěno bylo pravděpodobně na přelomu 18. a 19. století. V současné době již není možné na povrchu pozorovat jakékoliv doklady minulého osídlení (Jacobs 2014; foto M. Lulák).

Dolováním vápencových hornin začali lidé okolní prostředí a především reliéf ovlivňovat více. Před průmyslovou revolucí zaměstnávala těžba a vypalování vápence významnou část místních obyvatel – v létě se věnovali pastvě dobytka, zatímco v zimě vypalování vápence, který poté prodávali do celého Švédska. Jeho těžba probíhá až dodnes a průmysl rozvinutý okolo vápence vytváří významnou část ekonomiky celého kraje Dalarna (Jacobs 2014). Převážně ve východní části okraje impaktního kráteru Siljan, kde se nachází výchozy vápencových hornin, leží několik vápencových lomů (Dalhalla, obr. 2.30; Amtjärnsbrottet; Skålberget, obr. 2.3; Solberga I, obr. 2.31; Östbjörka), z kterých některé fungují dodnes (Osmundsberg, obr. 2.32; Solberga II).



Obr. 2.30 Bývalý vápencový lom Dalhalla (název vznikl z kombinace jmen kraje Dalarna a Valhally, severské mytologické síně, kam přicházejí padlí bojovníci) je v současné době přebudovaný do podoby amfiteátru, ve kterém probíhají koncerty živé hudby. Je v něm místo až pro 4000 návštěvníků a vyznačuje se vynikající akustikou. Vápence, které se v Dalhalle těžily, jsou bohaté na fosílie. Dají se zde najít zbytky schránek třídy Trilobita (např. rod Eobronteus) nebo např. živočichů třídy cystoidea (foto M. Lulák).



Obr. 2.31 Bývalý vápencový lom Solberga I. V tomto lomu prosakuje spodní voda a celý je podmáčený. Voda navíc obsahuje stopy ropy a jezírka tu mají charakteristický olejnatý duhový film na hladině. Navíc jsou ropné sloučeniny cítit i v místním ovzduší (foto M. Lulák).



Obr. 2.32 Vápencový lom Osmundsberg je ještě stále v provozu, i když jeho velkou část zabírá jezírko, jehož voda pochází ze zóny saturace. I vápenec z Osmundsbergu je velmi bohatý na fosílie, hlavně rodu Orthoceras a třídy Crinoidea. S revitalizací tohoto lomu počítá projekt geoparku Meteorum (více informací je dále v této podkapitole), v rámci něhož se tu má nad jezírkem postavit prosklená stavba pro turistické účely (foto M. Lulák).

Mimo vápenec se v oblasti kráteru Siljan těží i např. granity a to především v západní části impaktního kráteru (lom Torrvål, obr. 3.1; Färnäs), které se dále drtí na štěrk používaný na zpevňování cest. Vzhledem k obrovskému množství glacifluviálních sedimentů, především v okolí města Rättvik, se v oblasti impaktního kráteru Siljan těží také štěrk a písky (Ingels I a II; obr. 2.33).



Obr. 2.33 Lom nedaleko města Ingels kde se těží štěrk z mocných vrstev glacifluviálních sedimentů, které za sebou zanechaly účinky pevninského ledovce. Mimo štěrk se v této oblasti těží i písek. Glacifluviální sedimenty v podobě písků a štěrku mají v okolí Rättviku mocnost i více než 50 m ([18]; viz příloha 1 a 2; foto M. Lulák).

Mimo těžby hornin se v lokalitě impaktního kráteru Siljan lidé pokoušeli těžit i nerostné suroviny v podobě ropy a zemního plynu. První náznaky, že se zde nachází zásoby těchto surovin, lidé objevili už v 18. století (lokalita Osmundsberg, obr. 2.32; Jacobs 2014). Poté, co proběhla vlna objevování ropy v Severní Americe v 19. století, zde vzniklo několik vrtů používajících stejnou technologii (obr. 2.34). Ložiska ale nebyla bohatá a na skoro 100 let pokusy s těžbou ropy ustaly. Další průzkumné vrty proběhly až ke konci 20. století, poté co se zjistilo, že Siljanský prstenec má impaktní genezi, a je zde mnoho tektonických poruch a zlomů. I tyto vrty však byly neúspěšné.



Obr. 2.34 Springkällan je další geologicky zajímavé místo, ležící nedaleko Rättviku u řeky Draggån. V dubnu 1869 tu společnost Dala provedla průzkumný vrt s cílem zjistit, jestli se zde nachází ložiska ropy nebo zemního plynu. Vrtáři však narazili pouze na mocný zásobník podzemní vody pod tlakem, který napojili na trubku, a od té doby tu tato velice chutná voda vyvěrá do výšky skoro 3 m. Místní dělníci na jiných místech v okolí nepatrná ložiska ropy našli. Protože se jednalo o lukrativní zaměstnání a lidé o něj nechtěli přijít, údajně tyto méně výnosné vrty sami naplňovali kerosinem, aby si jejich zaměstnavatel neustále myslel, že ložiska jsou výnosná a pokračoval tak v jejich financování (Jacobs 2014, foto M. Lulák).

Kulturní dědictví v okolí impaktního kráteru Siljan se neomezuje pouze na památky po Vikinzích z ostrova Sollerön. Památky v podobě kostelů tu zanechali i křesťané, např. ve městě Boda a Rättvik (obr. 2.35). Za další významnou regionální kulturní památku by se dal považovat i Vasův běh (Vasaloppet). Jedná se o závod v běhu na lyžích pořádaný od

roku 1922 na památku úniku švédského krále Gustava Vasy v roce 1520 před dánským králem a každý rok se ho zúčastňuje až 16 000 lyžařů [11] z celého světa. Závod startuje ve vesnici Sälen, cíl leží v Moře (obr. 2.36) a je dlouhý 90 km.



Obr. 2.35 Křesťanský kostel v Rättviku (vlevo) a v Bodě. Kostel v Rättviku leží přímo na pobřeží jezera Siljan a jeho nejstarší části pochází ze 14. století. Kostel v Bodě je ve Švédsku unikátní. Vzhledem ke své poloze na vyvýšenině vápencového složení nemá klasický západovýchodní směr hlavní lodě, ale severojižní. Načervenalé fosiliferní vápence, na kterých stojí základy tohoto kostela, jsou plné pozůstatků živočichů rodu Orthoceras (foto M. Lulák).



Obr. 2.36 Socha v cíli Vasova běhu ve městě Mora. Trasa tohoto dálkového závodu v běhu na lyžích překonává několik vrcholů vysokých až 450 m n. m. (pro srovnání, nadmořská výška hladiny jezera Siljan, a tedy v podstatě i cíle, je 162 m n. m.). Závodu se každoročně zúčastňuje i mnoho Čechů (foto M. Lulák).

Samotný impaktní kráter Siljan má stále nevyužitý turistický potenciál. Projekt geoparku Meteorum si klade za cíl využít tento potenciál a rozšířit obecné povědomí o impaktních událostech a jejich důsledcích na přírodní prostředí (Jacobs 2014). Projekt chce vytvořit několik naučných stezek v rámci impaktního kráteru, které budou procházet

místa, kde jsou zachované impaktní reliktů nebo se nacházejí další geologické a přírodní zajímavosti. Projekt by také chtěl pomoci s revitalizací některých vápencových lomů a vystavět velkou vyhlídkovou věž přímo v centru prehistorické impaktní události. Hlavním řešitelem projektu Meteorum je místní rodák Thomas Jacobs. V současné době bohužel přípravy naučných stezek a cedulí váznou, protože projekt má nedostatečné financování. To by se však v budoucnosti mělo změnit. Budoucí geopark Meteorum a lidé v něm zasvěcení mimo jiné spolupracují i s českými zástupci našich geoparků (Jacobs 2014), například geoparku Český ráj a diskutují spolu další možnosti spolupráce.

3. Impaktní událost Siljan

3.1 Historie výzkumu impaktního kráteru Siljan

Komplexní impaktní kráter Siljan je největší prokázaný impaktní kráter v Evropě. Na možnost impaktní geneze tohoto kráteru jako první upozornili Fredriksson a Wickman (1963), i když zvláštní geologická stavba s koncentrickými výchozy paleozoických hornin v místě impaktního kráteru byla zmapována již v 19. století (Stolpe 1872; obr. 2.2, 2.4, 2.5). Teprve Svenson (1973) však objevil důkaz impaktní události v podobě strukturálních poruch, které jsou známé pod termínem tříštivé kužele (shatter cones) v místních granitech (obr. 3.1; více o tříštivých kuželech v podkapitole 4.2).



Obr. 3.1 Úlomky granitových hornin protozeroického stáří postižené impaktní událostí s výraznými jizvami v podobě tzv. tříštivých kuželů (shatter cones) – kuželovitých útvarů, které se v hornině vytvořily obrovským tlakem způsobeným impaktní událostí. Vlevo vzorek z granitového lomu u městečka Torrvål, vpravo vzorek z lomu u městečka Färnäs. Obě lokality s těžbou granitů leží nedaleko od sebe v západní části impaktního kráteru. Díky šokovému postižení je hornina křehčí a mnohem snáze se drtí na štěrk, který se tu následně používá ke zpevňování cest (foto M. Lulák).

Předpokládaný průměr původního kráteru se od jeho objevení postupně upřesňuje. Původní odhad Grieveho (1988) byl přibližně 52 km v průměru, avšak výzkumy Kenkmanna a Von Dalwigka (2000) ukázaly, že kráter Siljan mohl mít v průměru až 65 km a Henkel a Aaro (2005) odhad ještě zvýšili až na 75 – 85 km. Impakt byl pravděpodobně tak mohutný, že rozrušil celou mocnost zemské kůry (Gold a Soter 1980), která má v této části Baltského štítu mocnost přibližně 40 – 50 km [19].

3.2 Stáří impaktní události Siljan a hypotézy o jejím vztahu k velkému vymírání organismů v pozdním devonu

Již při zjišťování důkazů o impaktním původu celé struktury Siljanského prstence byly publikovány odhady, kdy se tato katastrofická událost udála. Protože horninový materiál, který lze snadno datovat (např. impaktní brekcie a taveniny vzniklé přímo během události), se již v lokalitě kráteru vyskytuje málo (Reimold et al. 2005a), byla doba vzniku impaktního kráteru Siljan dlouho sporná. První odhady uváděly po-silurské stáří impaktu (Svensson 1971, 1973). Bottomley et al. (1978) tyto odhady podpořili prvními analýzami, které určily stáří na přibližně 380×10^6 let, což odpovídá devonskému stáří. Další analýzy pomocí radiometrické datovací metody K-Ar provedené Åbergem a Bollmarkem (1985) a později Juhlinem (1991), který použil metodu ^{40}Ar - ^{39}Ar , vedly ke stáří 349×10^6 respektive $359 \pm 4 \times 10^6$ let. V současné době je obecně přijímané stáří impaktní události $377 \pm 2 \times 10^6$ let, určené Reimoldem et al. (2005a) metodou ^{40}Ar - ^{39}Ar .

Poté, co bylo v průběhu 60. let 20. století zjištěno studiem jiných planetárních těles ve sluneční soustavě, že impaktní události jsou v měřítku dlouhého geologického času poměrně časté, začala být hledána i spojitost mezi těmito událostmi a známými Velkými vymíráními organismů (Mass extinctions) během historie života na Zemi. Velké vymírání např. McGhee (1996) definuje jako událost ve fosilním záznamu, během které zanikne nejméně 15 % všech pozemských druhů a to za méně než 15×10^6 let.

Jako první pravděpodobně publikovali hypotézu o jednom nebo více velkých impaktech, které zásadně ovlivnily přírodní prostředí Země, geologové A. Kelly a F. Dacheille (1953). Předpověděli dokonce, že takováto událost je pravděpodobnou příčinou velkého vymírání organismů na přelomu křídý a paleogénu. Poté, co byla přijata tzv. Alvarezova hypotéza, týkající se tohoto posledního velkého vymírání (Alvarez et al. 1980), začal být hledán i „viník“ jednoho z pěti největších vymírání organismů v historii života na Zemi a to vymírání v pozdním devonu na přelomu stupňů frasn a famen (dále F/F). Tehdy zaniklo přibližně 60 % druhů obývajících všechny ekologické niky na Zemi (Goehring 2001).

Datování velkého devonského vymírání na přelomu F/F bylo v roce 2004 upraveno na $374,5 \pm 2,6 \times 10^6$ BP (Gradstein a Ogg 2004, Gradstein et al. 2004). Z tohoto důvodu bylo možné výsledky analýzy stáří Siljanské impaktní struktury Reimolda et al. (2005a)

uvést do souvislosti s devonským vymíráním organismů (Reimold et al. 2005a, Dypvik et al. 2008). Jsou však nezbytné další výzkumy, aby se upřesnilo jak stáří impaktu, tak přelom F/F a tedy i stáří samotného vymírání. K tomuto upřesnění mohou přispět i nově objevené lokality (navštívené i autorem, viz kapitola 4.2) s kvalitním odkrytím mnoha granitových bloků. Tyto bloky mají vyvinuty výrazné tříštivé kužely (obr. 4.1), které mohou být datovány např. pomocí metody měření změn magnetických vlastností hornin postižených tříštivými kužely (Adachi a Kletetschka 2008).

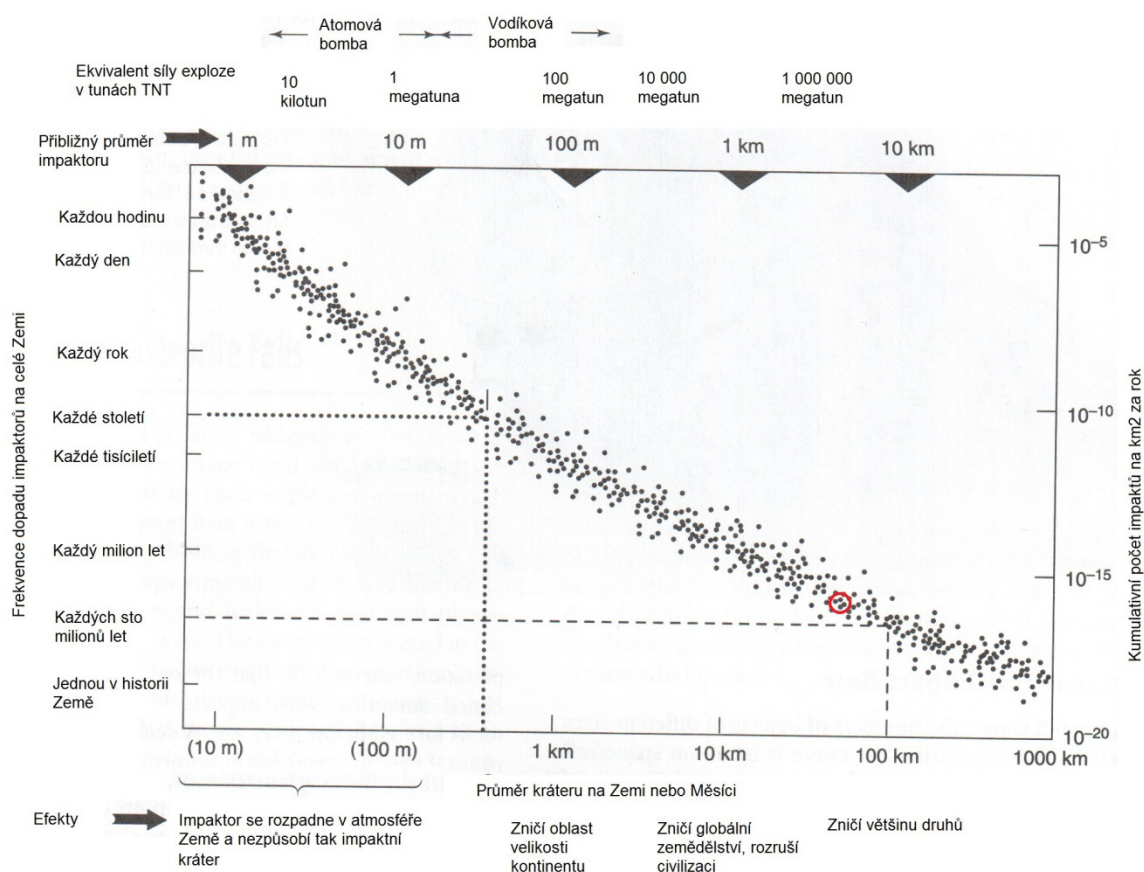
Další možnosti upřesnění korelace impaktní události s vymíráním F/F jsou v možnosti nalezení impaktních vyvrženin, případně taveniny, ve vrstvách odpovídajících rozhraní F/F (Dypvik et al. 2008). Na dvou lokalitách na území Belgie (Senzeille a Hony) byly mikrotektity ve tvaru sklovitých kuliček se stářím blízko rozhraní F/F nalezeny (Claeys et al. 1992, Claeys a Casier 1994, Goehring 2001), ale jejich impaktní původ ještě není zcela potvrzen. Claeys a Casier (1994) vypočetli, že vrstva vyvrženin z impaktní události Siljan, by měla být v místě belgické lokality Hony mocná přibližně 2-3 mm. Počítali však s průměrem kráteru Siljan pouze 52 km, přičemž tento kráter byl výrazně větší, viz výše v této kapitole. Sférické mikrotektity jsou v sedimentech v lokalitě Hony rozptýleny ve vrstvě mocné přibližně 2 cm, což je podle studie možné považovat za odpovídající rozptýlení Glasse a Simonsona (2012).

Je nutné poznamenat, že impaktní událost Siljan nebyla pravděpodobně dostatečně velká, aby způsobila tak velkou globální událost, jakou bylo vymírání organismů na hranici F/F. Mnozí badatelé (např. McGhee 1982, Walliser 1996) tedy spekulují o více impaktorech, které společně se Siljanem v daném období na Zemi dopadly. Pro ověření této hypotézy ale chybí dostatek důkazů, jakými jsou přímá pozorování impaktem postižených hornin, samotných kráterů, či zvýšené koncentrace iridia ve vrstvách hornin mezi F/F (Goehring 2001).

Vymírání organismů v pozdním devonu na přelomu F/F bylo pravděpodobně způsobeno několika katastrofickými procesy v geologicky poměrně krátké době (více v kapitole 5). Impaktor, který v devonu vytvořil kráter Siljan, mohl být jedním z faktorů této katastrofické mozaiky.

3.3 Impaktor

Z materiálu impaktoru se v kráteru Siljan nic nezachovalo (nebo nebylo dosud objeveno), takže je obtížné odhadnout jeho původní velikost. Vzhledem k průměru kráteru, který je odhadován na 55 – 85 km (Henkel a Aaro 2005), by podle předpokladů např. Shoemakera (1999), Hartmanna (2005) nebo Frenche (1998) měl mít impaktor velikost přibližně 3 – 5 km (obr. 3.2). Tento odhad je velmi nepřesný, protože záleží na řadě proměnných veličin. Jedná se o složení impaktoru (železitý impaktor o vyšší hustotě by mohl být menší při stejném účinku při dopadu, než chondritický typ o hustotě nižší), jeho rychlost (čím rychlejší impaktor byl, tím vyšší byla energie dopadu), a také o úhel dopadu (pokud do atmosféry impaktor vnikl pod ostrým úhlem, mohla se jeho velká část odtavit předtím, než dopadl na zemský povrch).



Obr. 3.2 Četnost impaktů meteoroidů do atmosféry Země vyjádřená jako funkce velikosti meteoroidu. Všechny osy jsou logaritmické. Na spodní ose jsou vyneseny průměry kráterů pro typickou rychlost $15 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. Horní osa ukazuje velikost impaktoru a účinek exploze vyjádřený v tunách TNT. Tečkovanou čarou je vynesena tzv. Tunguzská událost, exploze impaktoru nad Sibiří z roku 1908. Čárkovanou čarou je vynesen impakt, který před přibližně 66×10^6 roky vytvořil kráter Chixculub a zahubil 75 % všech pozemských druhů organismů. Přibližné umístění Siljanské impaktní události je naznačeno červeným kolečkem (upraveno dle Hartmanna 1999 a 2005).

Vzhledem ke stáří impaktní struktury a denudaci povrchu, která od vzniku kráteru Siljan proběhla, je naděje k nalezení pozůstatků impaktoru minimální. Je také možné, že se impaktor při svém dopadu celý vypařil a jeho složení by tak mohlo být zjištěno pouze z vyvrženin. Vyvrženiny impaktního původu obsahují ve větším množství prvky, které jsou na Zemi vzácné, např. iridium. Příkladem je kráter Chicxulub a vrstvička jílu s vysokou koncentrací iridia, která odděluje mezozoikum od kenozoika (Alvarez et al. 1980). Žádná podobná vrstva, odpovídající stáří impaktní události Siljan s vyšší koncentrací vzácných prvků, prozatím nebyla nalezena. Na dvou lokalitách v Belgii byly nalezeny pravděpodobné vyvrženiny v podobě sklovitých tektitů (Claeys et al. 1992, Claeys a Casier 1994), které však složením odpovídají horninám v místě dopadu a nikoliv hmotě impaktoru.

Impaktor Siljan měl při dopadu dle odhadů Frenche (1998) energii mezi $5,8 \times 10^{21}$ – $4,6 \times 10^{22}$ J, což odpovídá ekvivalentu $1,1 - 8,7 \times 10^7$ Mt TNT (atomová bomba shozená na japonskou Hirošimu měla energii odpovídající 20 kt TNT). Podle pozorování a výpočtů hustoty impaktů na Měsíci a na blízkozemních planetkách odvodili French (1998) a Hartmann (2005), že impaktor odpovídající velikosti kráteru Siljan na povrch Země dopadne jednou za cca 20 – 30 milionů let.

Doba vzniku impaktního kráteru byla kratší než několik minut, podle Frenche (1998) přibližně 5 minut. Důsledky dopadu tohoto impaktoru na paleogeografickou historii (nejen) oblasti kráteru se však v přípovrchové části zemské kůry a přímo na povrchových tvarech sledovaného území do určité míry zachovaly až do současnosti.

4. Povrchové tvary oblasti impaktního kráteru Siljan

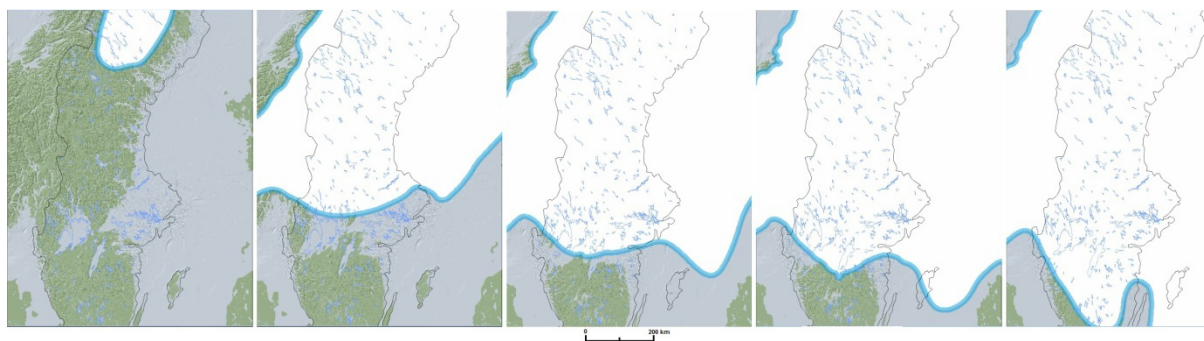
4.1 Geomorfologická charakteristika a hlavní etapy vývoje reliéfu

Geologickým fundamentem oblasti impaktního kráteru Siljan je Baltský štít prekambriického stáří (Gaal a Gorbatshev 1989). Jeho přípovrchová část, tvořená ve studované oblasti především granitoidními horninami, určuje primární morfostrukturní rysy reliéfu středního Švédska. Původní prekambriický horninový základ byl před začátkem paleozoika postižen několika cykly orogenezí (např. Svecokalerianská orogeneze mezi $1,9 - 1,8 \times 10^9$ BP; Weihed et al. 2005) během kterých docházelo i k metamorfóze některých hornin [2, 23]. Morfologické projevy těchto orogenetických procesů byly však v průběhu geologického času denudovány a oblast středního Švédska měla na začátku paleozoika ráz zarovnané úrovně (pravděpodobně etchplénu), tvořené především prekambriickými granity.

V průběhu paleozoika, kdy se Baltika nacházela nedaleko rovníku, došlo k transgresi moře a na etchplénu ve středním Švédsku došlo k sedimentaci materiálu anorganického i organického původu (Brunsell 2005). K rozsáhlé sedimentaci docházelo zejména v průběhu ordoviku a siluru. Mocnost sedimentárních vrstev vápenců, pískovců a břidlic vzniklých během této části paleozoika je odhadována od cca 500 m (Rondot 1975) až po možných 0,8 – 1,8 km (Collini 1988). Na počátku devonu došlo k regresi tropického moře (Thorslund 1985). Území středního Švédska se stalo opět souší a mocné sedimentární vrstvy hornin byly vystaveny erozi a denudaci. V pozdním devonu pak došlo k události, která ve studované oblasti vytvořila impaktní kráter Siljan. Impaktor podstatně rozrušil sedimentární souvrství, vzniklé v průběhu paleozoika a ovlivnil i podložní prekambriické horniny, ležící stovky metrů pod původním povrchem paleozoických sedimentů.

Od devonu až do konce neogénu byla oblast impaktního kráteru Siljan souší a probíhala na ní rozsáhlá denudace. Během tohoto období byly zcela oderodovány sedimentární vrstvy vzniklé v éře předchozí (paleozoiku) a denudace tak exhumovala prekambriický krystalinický horninový fundament. Granitoidní krystalinikum se tedy stalo základem současného reliéfu, jehož hlavními modelačními procesy byly spojeny s činností pevninských ledovců v kvartéru. Během pleistocénu se v oblasti Skandinávie v glaciálech vyvíjel a v interglaciálech opět zanikal kontinentální ledovec. Glaciální a periglaciální

procesy tedy vytvářely současné povrchové tvary a destrukční i akumulární tvary ve studované oblasti mají polygenetický vývoj. Ve studované oblasti lze identifikovat pouze relikty posledního maximálního zalednění, které odpovídá době přibližně 26 500 až 19 000 BP (Clark et al. 2009). Pozůstatky posledního kontinentálního ledovce se na severu Skandinávie nacházely ještě před 9000 lety (obr. 4.1), přičemž oblast kráteru Siljan byla ledovcem pokryta ještě přibližně před 9500 lety. Vysoká hmotnost pevninského ledovce způsobila pokles celého Baltského štítu izostatickými pohyby, a to i stovky metrů pod nynější hladinu moře. Naopak po ústupu ledovce se Skandinávie pomalu dodnes izostaticky zvedá, v současnosti místy až o 1 cm.rok^{-1} (Lindén 2006), přičemž v pleistocénu byl pohyb pravděpodobně ještě rychlejší. Popsané procesy v minulosti způsobily, že se jezerní pánev Siljan na určitou dobu propojila s Baltským mořem (Thorslund 1985), které samotné prošlo několika mořskými a jezerními stádii (Kráľ 1999). Izostatický výzdvih povrchu Skandinávie byl částečně kompenzován erozním působením glaciální, glacifluviální a fluviální činnosti. Izostatické pohyby a jejich nepřímý důkaz v podobě měnící se pobřežní linie jezera Siljan je dobře patrný např. jižně mezi Morou a ostrovem Sollerön u městečka Vinäs. Další dobře pozorovatelné relikty předchozí vyšší hladiny byly identifikovány na reliktech bývalé pobřežní linie jezera Orsasjön několik km severně od Mory (Yrgård 1982).



Obr. 4.1 Paleomapy rozsahu kontinentálního zalednění a pobřežní linie Skandinávie v období 13 000 – 9 000 BP. Mapa vlevo znázorňuje období 9000 BP, směrem vpravo mapy ukazují vždy o 1 000 let starší situaci. Oblast kráteru Siljan byla pokryta kontinentálním ledovcem ještě před (přibližně) 9 500 roky. Tento ledovec během svého ústupu v oblasti Siljanu zanechal mnoho reliktních, zejména pak glacifluviálních akumulací, morén, oblíků a eratika. K nejvýraznějším pozůstatkům glacienní činnosti patří pánev s jezerem Siljan (kolekce map vytvořena pomocí generátoru map SGU [13]).

Pozůstatky impaktního kráteru Siljan do značné míry určují konfiguraci morfostrukturních tvarů studované oblasti. Reliéf impaktního kráteru v podobě kruhové deprese vyplněné sedimentárními horninami je územím, kde vznikla převážná část

akumulačních tvarů a je morfostrukturním základem velkého počtu jezerních pánví, které se zde od konce pleistocénu vytvořily.

Jezerní pánve jsou tedy výrazným rysem současného reliéfu. Jezerní pánev Siljanu (obr. 2.16, 4.24) společně s dalšími velkými pánvemi (např. jezer Orsasjön, Skattungen, Ensen a další), zabírají více než polovinu obvodu celé deprese. Všechny jezera jsou ledovcového původu, tedy mladokvartérního stáří a většina z nich je propojena říčními systémy. V jihovýchodním okraji kráterové deprese se nachází také dvojice bezodtočných jezer vzniklých termokrasovými procesy (obr. 2.18), kdy došlo k izolaci a následnému roztátí ledovcové čocky v glacigenních a fluvioglaciálních sedimentech. Mezi četnými jezerními pánvemi v kruhové depresi kráteru Siljan protéká mnoho potoků a říček. Na glacifluviálních výplavových planinách mezi Rättvikem a Bodou místy vytvářejí meandry, a to především v malých údolích mezi hřbety eskerů (obr. 4.2).



Obr. 4.2 Příklad volného meandru jednoho z potoků na výplavové planině severovýchodně od Rättviku. Snímek zachycuje pohled z výsepního na jesešní břeh, kde jsou uloženy jemné fluviální sedimenty. Voda ve všech tocích v oblasti Siljanu má narezavělou barvu, protože většina z nich pramení v rašeliništích (foto M. Lulák).

Jezerní pánve nejsou jediné morfostrukturní tvary vyvinuté v reliktní kruhové depresi impaktního kráteru Siljan. Téměř celá druhá polovina deprese, která není vyplněna jezerními pánvemi, je tvořena místy až 50 m mocnými glacifluviálními akumulacemi sedimentů různorodého zrnitostního charakteru (obr. 4.3, 4.4). Z jemných frakcí těchto akumulací se místy vytvořily eolickými procesy i duny. Současná města na

okraji jezera Siljan, Mora a Rättvik, leží na těchto rozsáhlých akumulacích, které mají podobu fosilních glacifluviálních delt. Část Mory se na těchto nestabilních sedimentech v roce 1659 sesunula přímo do jezera Siljan. Při tomto neštěstí ale nebyl nikdo zraněn, protože obyvatelé byli v té době v kostele na bohoslužbě (Jacobs 2014).



Obr. 4.3 Rozsáhlé glacifluviální akumulace v okolí Rättviku dosahují mocnosti až 50 m. Na severovýchodním okraji Rättviku jsou písky a štěrky těženy v místě fosilní glacifluviální delty z konce mladšího pleistocénu. Z jemných zrnitostních složek glacigenních a glacifluviálních sedimentů se po ústupu ledovce vytvářely eolickými procesy i duny (foto M. Lulák).



Obr. 4.4 Eolické akumulace jemných písků u Rättviku ležící na zrnitostně různorodých fluvioglaciálních sedimentech. Ve svrchní části této akumulace probíhají intenzivní pedogenetické procesy (foto M. Lulák).

V okolí impaktního kráteru Siljan lze pozorovat nejen fosilní glacifluviální delty, ale také recentní říční delty. Jedna z nich se nachází nedaleko Mory v přírodní rezervaci Alderängarna (obr. 4.5). Tato delta je vyvinutá na řece Österdalälven (obr. 2.14), která se zde rozlévá na větší plochy a pomalu odtéká do jezera Siljan. Popsaná delta má rozlohu přibližně 2 km², na mnoha místech prorůstá v současné době rašelinou a tvoří významný ekologický prvek, především pro ptactvo.



Obr. 4.5 Recentní delta na řece Österdalälven, která je chráněná jako přírodní rezervace Alderängarna. Vlevo je zachyceno místo zarostlé rašelinou přibližně uprostřed delty, kterou protéká velké množství potoků a říček. Tyto malé toky neustále vytvářejí nová koryta a volné meandry. Vpravo je ukázána část západního okraje delty řeky Österdalälven, tvořená výrazně opracovanými štěrky. Velké pravidelně uspořádané kameny jsou člověkem vytvořeným můstkem mezi dvěma ostrůvky (foto M. Lulák).

Fosilní glacifluviální delta v okolí Rättviku i Mory plynule přechází do ledovcové výplavové planiny, tvořené nánosy glacifluviálních uloženin. Ledovec při ústupu v těchto místech vytvořil četné akumulární tvary, především ve formě eskerů (obr. 4.6), tedy hřbetů vytvořených původně jako výplň podledovcových tunelů, kterými proudila voda.



Obr. 4.6 Pohled ze hřbetu jednoho z mnoha eskerů v jihovýchodní části impaktního kráteru Siljan. Eskery zde vytvářejí nepravidelné akumulace jako hřbety mezi četnými jezerními pánvemi (foto M. Lulák).

Velmi dobře vyvinuté eskery lze pozorovat i na okraji přírodní rezervace Alderängarna západně od Mory (obr. 4.7), kde vytvářejí specifický reliéf s častými pomalými svahovými pohyby.



Obr. 4.7 Stezka na výrazném hřbetu jednoho z eskerů v přírodní rezervaci Alderängarna (foto M. Lulák).

V oblasti impaktního kráteru Siljan lze pozorovat i pozůstatky četných morén, které zde zanechal ustupující kontinentální ledovec. Velké množství kopečkových morén se nachází v centrální a západní části centrálního pahorku kráteru Siljan, ale také na jihozápad od města Mora. Další poměrně četné glacigenní akumulční tvary jsou drumliny. Velké množství se jich nachází v západní části centrálního pahorku kráteru Siljan a všechny jsou protažené v jihojihovýchodním směru. Pohybující se ledovec zanechal na povrchu nynějšího reliéfu u jezera Siljan také velké množství eratických balvanů, resp. bloků granitických hornin. Eratika jsou četná např. nedaleko Vikarbynu, kde docházelo k pohybu ledovce jižním směrem do deprese, která je v současnosti vyplněna jezerem Siljan. Eratické bloky se vyskytují také na okraji východní části deprese impaktního kráteru Siljan u jezera Ljugaren.

Ustupující kontinentální ledovec v oblasti kráteru Siljan nezanechal v reliéfu pouze akumulční tvary. Na mnoha místech působil také destruktivním účinkem, přičemž nejvýraznějšími destrukčními tvary, které v oblasti Siljanu činnost ledovce zanechala, jsou poměrně hluboká glacifluviální údolí (obr. 4.8). Jsou četná nejen v kruhové depresi, ale místy i na reliktu centrálního pahorku uprostřed impaktního kráteru Siljan. V některých částech glacifluviálních údolí jsou odkryty v podloží sedimentární horniny paleozoického stáří hluboko zanořené při impaktní události (obr. 4.9).



Obr. 4.8 Jedno z mnoha glacifluviálních údolí vzniklých při ústupu ledovce na počátku holocénu. Ledovec tímto místem postupoval směrem na jihozápad (ve směru záběru na fotografii) až k lokalitě se současným jezerem Siljan (foto M. Lulák).



Obr. 4.9 Glaciální údolí Trollskuru severně od městečka Vikarbyn, kde ledovec hluboce erodoval paleozoické vápence. Tyto vápence mají načervenalou barvu a jsou ekvivalentní výchozům hornin na břehu jezera Siljan mezi Vikarbynem a Rättvikem (obr. 4.23). Na skalních svazích kaňonovitého údolí, kde dochází v současné době k přirozené sukcesi lesa, jsou výchozy s četnými fosíliemi, a to především jedinců rodu Orthoceras (foto M. Luňák).

Postglaciální erozní činnost potoků a řek na četných místech vytvořila i glacifluviální srázy a skalní stupně. Jeden z největších skalních stupňů v lokalitě kráteru Siljan se nachází necelý 1 km západně od městečka Boda. Původně glacifluviální tok zde vytvořil úzké údolí se skalním stupněm o výšce přibližně 36 m (obr. 4.10), které se stále prohlubuje zpětnou a hloubkovou erozí. Tímto údolím protéká řeka Styggforsån a tvoří zde vodopád Styggforsen (obr. 2.15). Prudký skalní stupeň Styggforsen vznikl, protože se zde potkávají dva různé druhy hornin. Původní tvrdší prekambrický podklad z granitů je v kontaktu s měkčími paleozoickými sedimentárními vápenci a pískovci, které ledovec rychleji erodoval.



Obr. 4.10 Pohled na horní část skalního stupně vodopádu na řece Styggforsån, který má výšku 36 m. V pozadí vystupuje granitový výchoz, z něhož je pořízena fotografie č. 2.15. Soutěska na dně glaciálního údolí byla vyhloubena fluvialní erozí během holocénu a od tohoto místa pokračuje jižním směrem ještě přibližně 0,5 km (foto M. Lulák).

Defrakce a detenze ledovce na jeho bázi destruktivně působila také horninové výchozy prekambriického stáří, které jsou četné především v centrální části impaktního kráteru Siljan. Na řadě těchto skalních výchozů lze pozorovat ohlasy vytvořené abrazí ledovce (obr. 4.11), který s sebou unášel i množství klastů. Výchozy krystalinických hornin byly ledovcem navíc tvarovány do formy oblíků (např. vrchol Gesundberget jižně od Mory tvoří mohutný oblík, či skupina oblíků na vrcholu Knytberget na obr. 4.12), většinou protažených ve směru severozápad – jihovýchod.



Obr. 4.11 Výrazné ledovcové ohlasy na bloku granitu typu Järna u osady Ingärtningsbodarna ve střední části centrálního pahorku impaktního kráteru Siljan (foto M. Lulák).



Obr. 4.12 Skupina oblíků s ledovcovými ohlasy narušená kryogenním zvětráváním na granitech hřbetu Knytberget (460 m n. m.) ležícího 10 km jižně od Rättviku (foto M. Lulák).

Periglaciální a kryogenní zvětrávání narušovalo po ústupu ledovce především přípovrchovou část prekambrických a paleozoických hornin. Dobře pozorovatelné účinky periglaciálních procesů jsou v místních granitových lomech, kde jsou odkryté několikametrové stěny. Ve svrchních částech jsou bloky hornin mnohem více rozrušené a i jejich současná těžba je snazší (obr. 4.18). Periglaciální činnost působí i na svazích

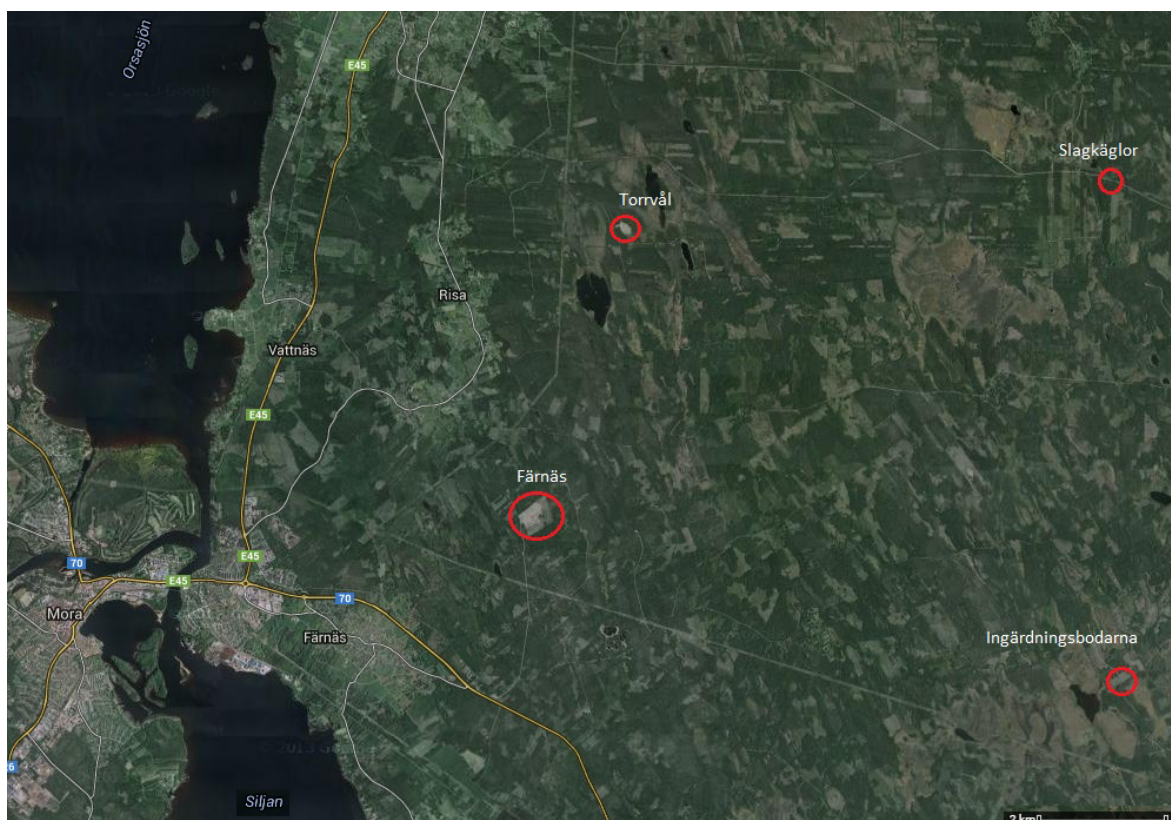
místních kopců, kde dochází k soliflukčním pohybům. Relikty permafrostu nejsou ve studované oblasti zjištěny. V období převažující periglaciální činnosti (tedy po ústupu kontinentálního ledovce), kdy ještě nebyl dostatečně vyvinut vegetační pokryv, probíhala i výrazná eolická činnost, jejichž produkty jsou zachovány v eolických akumulacích tvarech (obr. 4.4). Západně od jezera Orsasjön je zachováno z této doby největší dunové pole v celé Skandinávii (Thoslund 1985).

Antropogenní činnost během několika posledních desítek let také měla vliv na místní reliéf a krajinu. Především byly vytěženy zachovalé výchozy a vyvýšeniny paleozoických hornin, hlavně vápenců. Takto vznikly prohlubně v terénu ve formě lomů a roklí (např. obr. 2.30), které jsou četné po celém obvodu deprese impaktního kráteru Siljan. Antropogenní činnost ovlivnila i sedimentační rychlost některých řek. Například výstavba vodní nádrže Spjutmosjön na řece Österdalälven zcela jistě ovlivní další vývoj říční delty (obr. 4.5), která leží jen několik km po proudu a je chráněná jako přírodní rezervace.

Z výše popsaných povrchových tvarů v lokalitě impaktní události Siljan je zřejmé, že současný reliéf je nejvíce ovlivněn nejmladšími kvartérními procesy a událostmi. Přesto se nedá podcenit i morfostrukturní a klimato-morfogenetický význam předkvartérních jevů a procesů, včetně postupného vzniku rozsáhlé zarovnané úrovně. Přesto však byly zachovány relikty impaktní události z devonu a to jak v povrchových tvarech, tak i v geologických útvech.

4.2 Relikty impaktní události Siljan

Impaktní geneze Siljanského prstence byla prokázána objevením přímých impaktních reliktnů - tříštivých kuželů (viz kapitola 3). Dále v této kapitole jsou popsány další relikty impaktní události a jejich morfologická pozice v rámci celé impaktní struktury Siljanu.



Obr. 4.13 Mapa lokalit s pozorovanými přímými impaktními relikty. Tříštivé kužele se vyskytují v granitových lomech Torrval a Färnäs a na lokalitě Slagkägler. Krásný příklad impaktní brekcie se nachází na lokalitě Ingårninsbodarna. Bohužel není in situ – horninový blok brekcie sem byl dovezen odjinud. S lokalitami Ingårninsbodarna a Slagkägler počítá projekt Meteorum (viz podkapitola 2.6) jako se zastávkami geoparku (výřez mapy vyroben pomocí Google Earth Pro).

Impaktem natavených brekcií, se v okolí Siljanského kráteru dochovalo velmi málo. Absence brekcií impaktního původu pravděpodobně souvisí především s vysokým stářím impaktní události. Impaktem natavené brekcie totiž společné s impaktní taveninou vznikají nejbližší (pokud se nebere v potaz materiál, který se přímo vypaří) epicentru impaktní události (French 1998; obr. 4.15). Jejich největší množství se tedy po vzniku kráteru nachází na jeho dně a v malé hloubce pod povrchem. Vzhledem k tomu, že stáří impaktní události je přibližně 377 milionů let (Reimold et al. 2005a, více v podkapitole 3.1), je zřejmé, že nejsvrchnější útvary, mezi které patří i impaktem natavené brekcie, byly

postiženy erozí více, než struktury a horniny, které vznikly ve větší hloubce (např. tříštivé kužele). Příkladem impaktem natavených brekcií jsou bloky granitů u Ingärtningsbodarna (obr. 4.14). Jedná se o dva poměrně velké (přibližně 0,5 m³) bloky hornin přemístěné jako budoucí součást naučné stezky geoparku (Jacobs 2014).



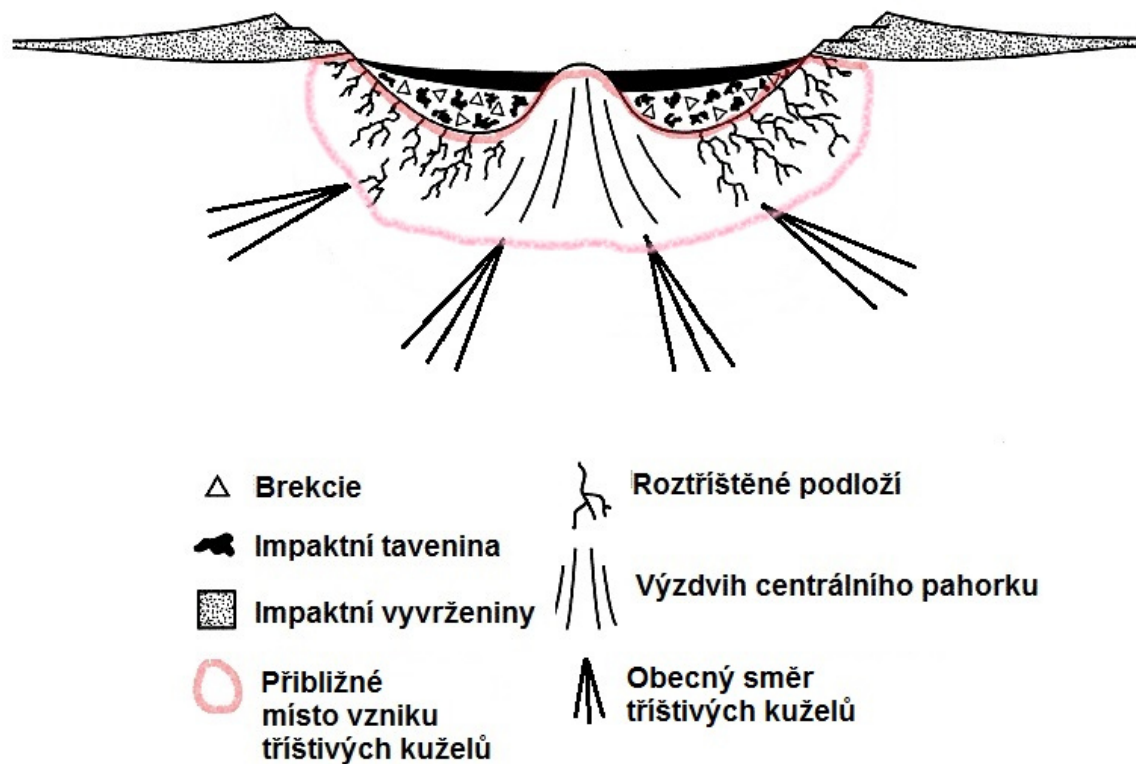
Obr. 4.14 Impaktem natavené brekcie v lokalitě Ingärtningsbodarna. Oba bloky nepochází z této lokality, byly přemístěny a jejich původní místo je neznámé (foto M. Lulák).

Impaktem natavené brekcie, stejně jako impaktní tavenina, jsou rozmístěny především ve svrchních částech impaktních kráterů (obr. 4.15) a proto jsou možnosti jejich nalezení v současné době velmi malé. Významná část svrchní části kráteru Siljan byla zničena erozí a denudací. Pravděpodobná impaktní tavenina původem ze Siljanského kráteru v podobě tektitů se dá pozorovat na dvou belgických lokalitách v sedimentech pozdně devonského stáří (Claeys et al. 1992, Claeys a Casier 1994; více v kapitole 3.1).

Další impaktní relikt, který je v oblasti Siljanu poměrně četný, jsou tzv. tříštivé kužely (shatter cones, obr. 3.1). Jedná se o jeden z přímých důkazů impaktního původu celé Siljanské kruhové struktury, na který poukázal již na začátku sedmdesátých let 20. století Svenson (1973). Na pravděpodobný impaktní původ tříštivých kuželů první upozornil Dietz (1959). Tříštivé kužely totiž byly nalezeny na mnoha místech tzv. kryptoexplozí (explozí neznámého původu), avšak nikde ve spojitosti s vulkanickými procesy (Dietz 1968). Většina těchto kryptoexplozí byla později potvrzena jako místa dávných impaktních událostí. Shoemakerovi et al. (1961) se podařilo vytvořit tříštivé kužely i experimentálně vysokorychlostními projektily narážejícími do dolomitových

hornin. Navíc byly objeveny i na místech jaderných výbuchů (Bunch a Quaide 1968). O impaktním původu tříštivých kuželů za vysokých tlaků se tedy již nepochybuje. Není však zcela jasné, jak a kdy dochází k jejich vzniku během impaktní události (Adachi a Kletetschka 2008). Předpokládá se, že tříštivé kužely vznikají v počáteční fázi samotné impaktní události jako důsledek první rázové vlny, která způsobí kompresi postižených hornin (Sagy et al. 2002, 2004). Naopak Nicolaysen a Reimold (1999) a Weiland et al. (2006) předpokládají vznik tříštivých kuželů během závěrečné fáze vývoje impaktního kráteru a navíc uvádějí i vliv petrografie hornin. Například v kráteru Siljan jsou všechny pozorované příklady tříštivých kuželů vyvinuty v granitových horninách. U dalších pozemských impaktních kráterů jsou tříštivé kužely pozorovány i v křemencích nebo vápencích (French 1998; obr. 4.17).

Tříštivé kužely vznikají v místech, kde již nedochází k přímému natavení horniny samotnou impaktní událostí. Vznikají tedy ve větší vzdálenosti od epicentra výbuchu, než impaktní brekcie (obr. 4.15). Jen díky této vlastnosti se v kráteru Siljan dochovaly až do dnešní doby v poměrně hojném počtu. Některé tříštivé kužely však mají na svém povrchu tenkou sklovitou vrstvu, která vznikla prudkým zahřáním svrchní vrstvy postižené horniny (Nicolaysen a Reimold, 1999), podobné exempláře ale není možné v oblasti kráteru Siljan pozorovat. Podle Miltona (1977), Roddyho a Davise (1977) a Sagyho et al. (2004) procesy vzniku tříštivých kuželů probíhají za tlaků přibližně 2 – 10 GPa. Jiní autoři, např. French (1998), uvádějí tlaky 2 – 30 GPa a Nicolaysen a Reimold (1999) a Sharpton et al. (1998) dokonce hodnoty mezi 4 – 45 GPa. Podle Frenche (1998) dochází při tlacích větších než 50 GPa k částečnému natavení postižených hornin. Pokud šokové postižení je tak velké, že tlak přesáhne 100 GPa, dochází k výparu hornin.



Obr. 4.15 Schéma tvarů obecného komplexního impaktního kráteru, mezi které se řadí i impaktní kráter Siljan. V červeném poli je znázorněna přibližná lokalizace vzniku tříštivých kuželů během impaktní události. Z tohoto schématu je zřejmé, že tříštivé kužely vznikají dále od epicentra výbuchu, než impaktní brekcie (upraveno dle [12]).

Prokazatelná impaktní geneze tříštivých kuželů není jediná vlastnost, která umožňuje studium struktury impaktních kráterů. Vrcholky deformací ve tvaru kuželů totiž míří směrem ke středu impaktního kráteru, tedy na bod místa dopadu impaktoru (obr. 4.16; Davis a Reynolds, 1996, Nicolaysen a Reimold 1999). Mohou tedy být využívány k lokalizaci starých impaktních událostí v dnes již silně denudovaných skalních masivech.



Obr. 4.16 Červená šipka znázorňuje směr k epicentru impaktní události, který lze odvodit od tvaru tříštivých kuželů – jejich vrcholky míří směrem k výbuchu (foto M. Lulák).

V oblasti impaktního kráteru Siljan se nachází několik míst, kde je možné tříštivé kužely velmi dobře pozorovat. Jedná se v převážné většině o granitové lomy, kde jsou horniny skalního podkladu odkryté (viz příloha 1; [18]) a přístupné. Na všech lokalitách jsou zachovány pouze hůře vyvinuté tříštivé kužely ve formě tzv. „horsetailing“. Kužely nejsou tak zřetelné jako na jiných lokalitách po světě a mají podobu striací ve tvaru kuželů (obr. 4.17; French 1998).



Obr. 4.17 Dokonale vyvinuté tříštivé kužely v jemnozrnném vápenci pocházejícím z lokality impaktní události Haughton (Kanada). V porovnání s obr. 4.16 je zřetelné, že tříštivé kužely v granitech ze Siljanské impaktní lokality nejsou takto výrazně vyvinuté a je na nich zřetelně patrná pouze striace (French 1998; foto R. A. F. Grieve).

Významná lokalita s tříštivými kužely se nachází v granitovém lomu nedaleko městečka Färnäs. Granity typu Siljan jsou zde silně narušené impaktní událostí a jsou v současné době strojově těženy. Bohužel se zde nedají nalézt tříštivé kužely *in situ*, ale pouze v nalámaných a přemístěných blocích na dně lomu (obr. 3.1). Vnější masivy granitových hornin již byly erodovány intenzivními glaciálními a periglaciálními procesy (obr. 4.18), včetně mrazového zvětrávání. Je zřejmé, že v současné době dochází i k občasnému zaplavování dna lomu vodou.



Obr. 4.18 Stále funkční lom na granitové horniny nedaleko městečka Färnäs. Místní granity jsou stejně jako v lomu Torrvål (obr. 3.1) postižené impaktní událostí v podobě tříštivých kuželů. Místní granity jsou křehčí a výrazně lépe se tak drtí na šterk. Na obrázku je dobře viditelná svrchní vrstva hornin výrazně postihnutá periglaciálním zvětráváním. Ve svrchní vrstvě probíhá i v současnosti sezónní mrazové zvětrávání granitů. Lze také pozorovat protékání vody v trhlinách a puklinách (foto M. Lulák).

Tříštivé kužely lze také pozorovat v dalším granitovém dole, který se nachází stejně jako lom Färnäs v západní části Siljanského prstence u městečka Torrvål (obr. 4.13). Místní granity mají tříštivé kužele velmi dobře vyvinuty a v době průzkumu (srpen 2014) zde bylo mnoho vytěžených několikametrových bloků s těmito výraznými impaktními strukturami (obr. 4.19).



Obr. 4.19 Lom Torrvals, kde se těží granity typu Siljan jako v lomu Färnäs. Vlevo je ukázka mohutného odstřeleného bloku s výraznými tříštivými kužely. Thomas Jacobs, hlavní manažer projektu Meteorum, slouží jako měřítko. Vpravo je snímek řady granitových bloků odstřelených ze stěn lomu, které jsou následně dále drceny na menší kusy a poté na štěrk. Na většině těchto bloků lze pozorovat tříštivé kužely (foto M. Lulák).

Další lokalita, kde mohl autor pozorovat tříštivé kužely, se nazývá Slagkägglor a leží nedaleko centra impaktního kráteru (obr. 4.13). Jedná se o lokalitu, kde byly tříštivé kužely poprvé objeveny a kde získali vzorky pro dataci impaktní události Reimold et al. (2005a). Tato lokalita se nachází nedaleko malé osady Hättberg, kde jsou poměrně malé výchozy granitových hornin. Dokumentovaný výchoz je dnes již značně zarostlý a dochází zde k přirozené sukcesi lesa, avšak obnažené bloky granitových hornin s tříštivými kužely lze dosud najít (obr. 4.20).



Obr. 4.20 Úlomek granitové horniny s tříštivými kužely na lokalitě Slagkägglor. Na rozdíl od tříštivých kuželů z Färnäs a Torrvals jsou tyto struktury vyvinuty v granitu typu Järna, který je mladší než typ Siljan. Celá lokalita je již značně zarostlá, i přesto však se zde dají úlomky hornin pozorovat (foto M. Lulák).

V lokalitě impaktního kráteru Siljan je možné pozorovat i větší reliktů impaktních procesů. Mezi jejich zástupce patří např. velké zlomy v sedimentárních horninách ve vápencovém lomu Dalhalla (obr. 2.30), odkryté činností v lomech. Tyto fraktury vznikly během samotné impaktní události, kdy náraz impaktoru způsobil narušení vápencových sedimentárních vrstev (obr. 4.21), které byly dostatečně vzdálené od epicentra, takže u nich nedošlo k jinému (většímu) šokovému poškození.



Obr. 4.21 Výrazné zlomy (šedočerná barva) ve vápencových sedimentech paleozoického stáří v lomu Dalhalla. Jako mnoho dalších geologicky unikátních tvarů jsou i tyto zlomy pozůstatkem katastrofy v podobě dopadu velkého impaktoru v pozdním devonu (foto M. Lulák).

V místních vápencových lomech lze pozorovat i nepřímé důsledky impaktní události. Od vzniku paleozoických sedimentárních hornin zde neproběhla žádná orogeneze (Ager 1980), přesto jsou vrstvy vápencových, pískovcových a břidlicových hornin na mnoha místech přemístěny takřka do vertikální polohy (obr. 2.3, 4.22). Jejich pozorovaná poloha je způsobena právě dopadem impaktoru během pozdního devonu. V lokalitě impaktního kráteru je možné pozorovat různé směry zvrstvení v závislosti na vzdálenosti od centra impaktní události (obr. 4.23). Blíže k epicentru jsou souvrství vápenců

v podstatě kolmé k vodorovné poloze, zatímco o několik km dále od centra impaktního kráteru jsou uloženy téměř v původní horizontální poloze.



Obr. 4.22 Vertikální zvrstvení sedimentárních hornin způsobené impaktní událostí. Vlevo vápencový lom Östbjörka, vpravo vrstvy břidlic nedaleko vodopádu Styggforsen (obr. 2.15). Obě lokality se nacházejí přibližně 15 km od centra impaktního kráteru Siljan (foto M. Lulák).



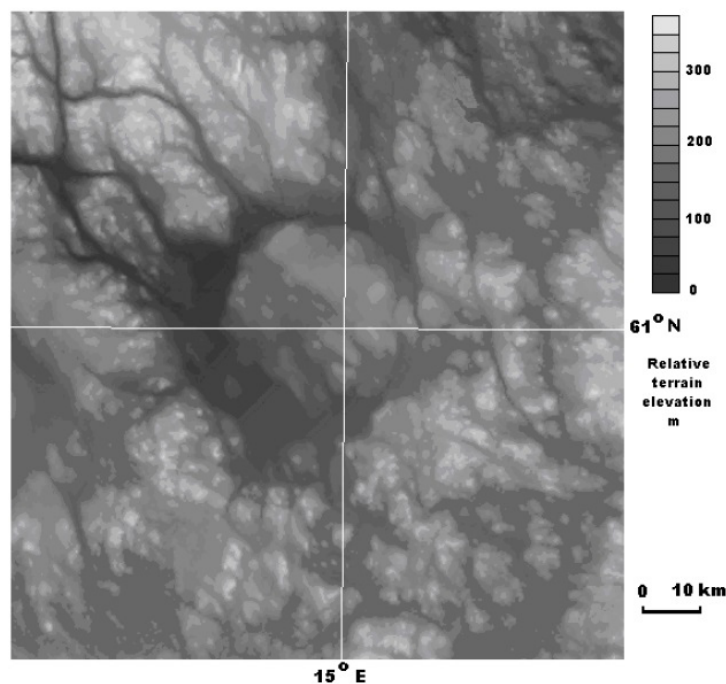
Obr. 4.23 Pobřeží jezera Siljan nedaleko městečka Vikarbyn s výchozem sedimentárních hornin. Jedná se o vápence typu Boda a je v nich možné pozorovat fosílie rodu Orthoceras (např. v levé horní části fotografie jedinec o délce skoro 50 cm). Tato lokalita se nachází přibližně 25 km od centra impaktní události a zvrstvení paleozoických sedimentárních hornin tu má na rozdíl od lokalit ležících blíže centru (obr. 4.22) v podstatě horizontální směr (foto M. Lulák).

Největší pozorovatelný impaktní relikt představuje samotná kruhovitá deprese (obr. 4.24), která představuje rozsáhlou morfostrukturu s průměrem přibližně 35-38 km. Dle odhadů citovaných v kapitole 3 je tedy zřejmé, že se nejedná přímo o kráterový lem, který byl původně pravděpodobně až 2x dále. Důvodem, proč je deprese stále přítomna, i přes velké stáří impaktního kráteru, je její horninové složení. Celý prstenec, jehož šíře

kolísá mezi přibližně 3 až 10 km, je na rozdíl od okolních protozeroických granitových hornin, tvořen horninami sedimentárními, a to především vápenci a pískovci paleozoického stáří. Tyto sedimentární horniny tvořily v době vzniku kráteru (pozdní devon) souvrství mocné pravděpodobně několik stovek metrů (Thorslund 1985, Brunsell 2005). Během dopadu impaktoru byly tyto sedimentární horniny pohřbeny hluboko pod tehdejší povrch. Eroze během následujících téměř 400 milionů let způsobila odnos svrchních vrstev (více v kapitole 5) a koncentrické vrstvy, zahloubené během impaktu, se tak dostaly v podobě kruhových výchozů opět na povrch. Vzhledem k tomu, že podléhají erozi a denudaci mnohem rychleji, než tvrdší granitové horniny v blízkém okolí, vznikla tak kruhovitá deprese, po obvodu místy zaplněná vodními plochami, včetně jezera Siljan (obr. 4.25).

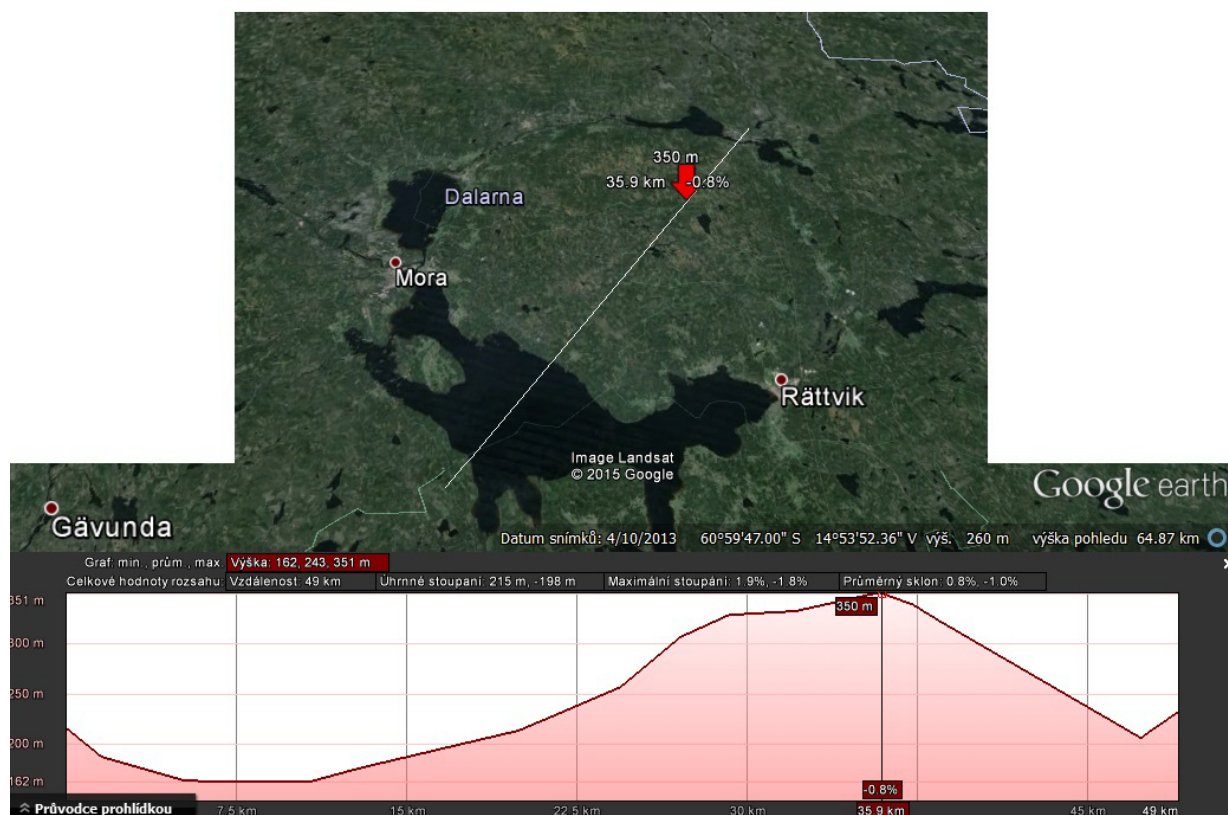


Obr. 4.24 Pohled z okraje (současného) kráteru nad městem Rättvik směrem na severozápad do deprese zčásti vyplněné jezerem Siljan. Na horizontu je možné pozorovat pokračující okraj kráteru. I přes velké stáří je struktura stále dobře pozorovatelná, dokonce i ze země bez použití prostředků DPZ (foto M. Lulák).



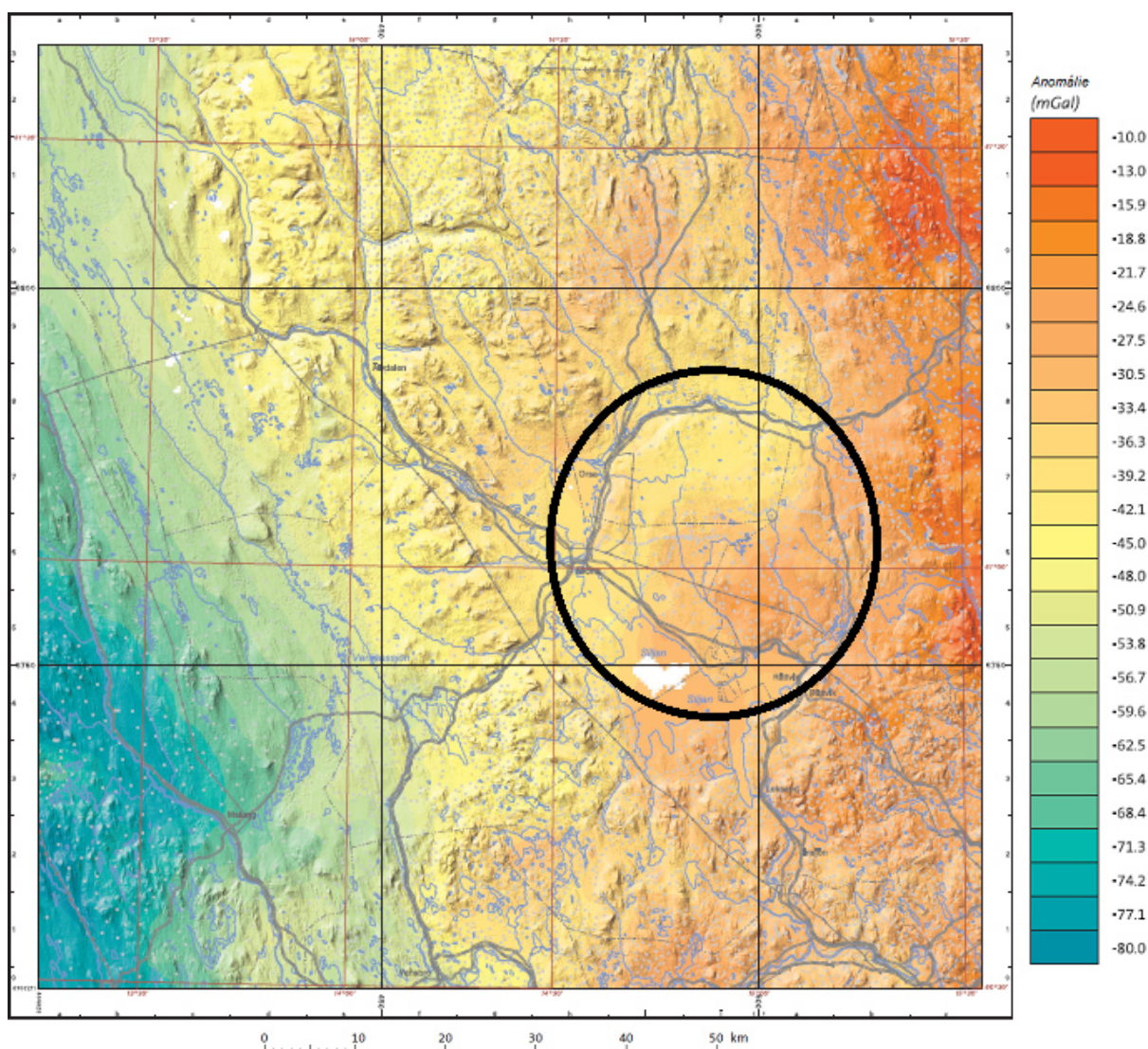
Obr. 4.25 Okolí impaktního kráteru Siljan v digitálním výškovém modelu s roztečí 50 m. Kruhovitá deprese v sedimentárních horninách je jasně zřetelná (Henkel a Aaro 2005).

Pozůstatek centrálního vrcholku má průměr přibližně 30 km a dodnes je přibližně o 300 m vyšší (pokud se bere v potaz dno jezera Siljan), než nejnižší místo v rozsáhlé kruhové depresi (obr. 4.26).



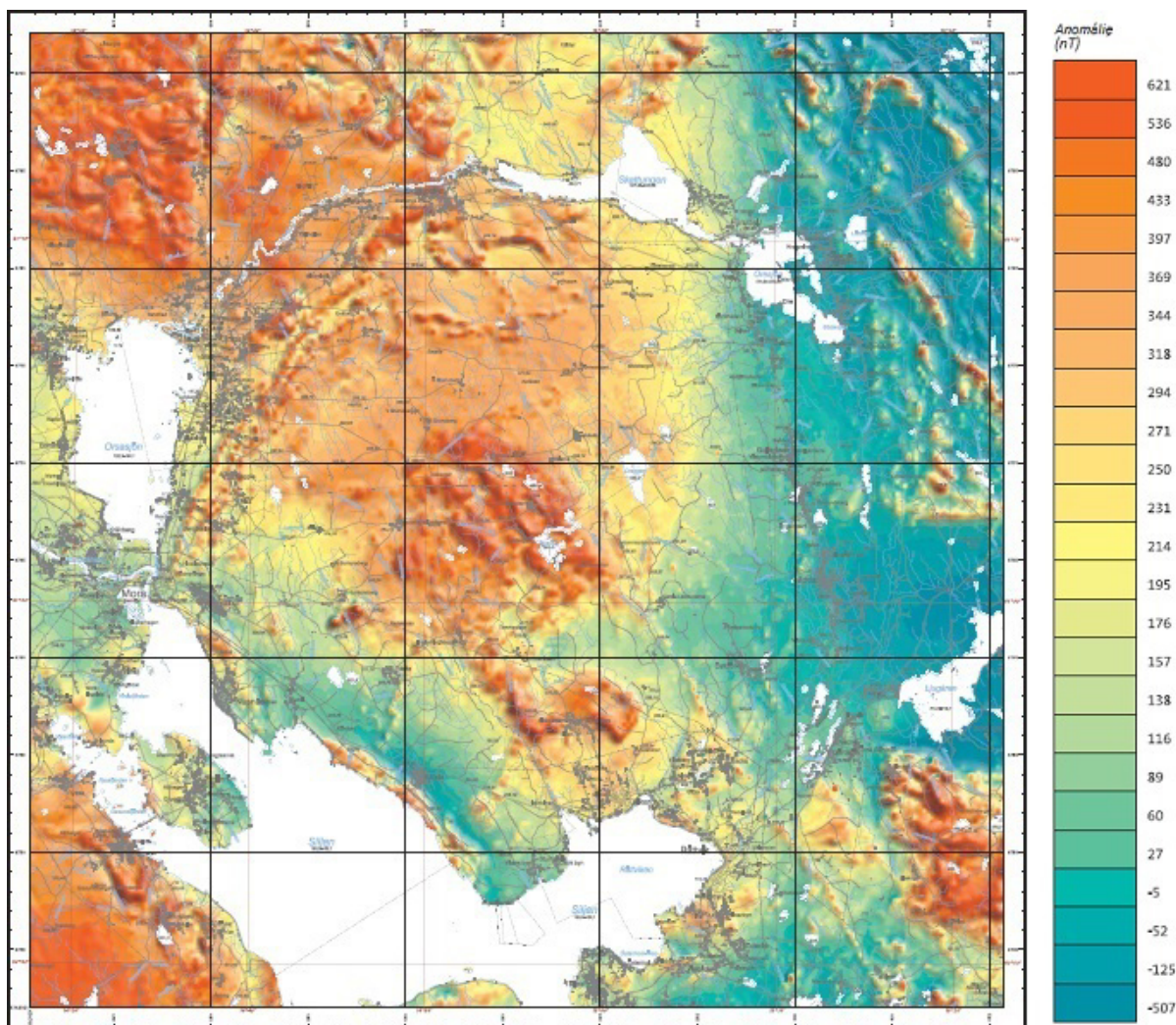
Obr. 4.26 Relativní výškový profil přes pozůstatek impaktního kráteru Siljan. Stále je nápadná existence centrálního vrcholku, tvořeného především granitovými horninami a také reliktů okrajů kráteru. Nejnižší místo v profilu je 162 m n. m., což odpovídá současné hladině jezera Siljan. Jezero má hloubku v nejnižším bodě 140 m a rozdíl je tedy přibližně 300 m (obrázek vytvořen pomocí programu Google Earth Pro).

Zobrazení Bouguerových tíhových anomálií v oblasti impaktního kráteru Siljan a jeho širším okolí výraznou impaktní strukturu neukazuje (obr. 4.27). Nápadná je pouze přítomnost hornin s vyšší hustotou v severní části impaktní struktury (Henkel a Aaro 2005). Jedná se o granity typu Järna, které mají oproti granitům Siljan hustotu průměrně vyšší o necelých 60 kg.m^{-3} (Järna – 2675 kg.m^{-3} , Siljan – 2618 kg.m^{-3}).



Obr. 4.27 Mapa Bouguerových tíhových anomálií v okolí oblasti impaktního kráteru Siljan. Pozůstatek (nynější kruhovitá deprese) kráteru je v mapě vyznačen černým kruhem o skutečném průměru cca 35 km. Kráter Siljan se tedy ve zobrazení těchto tíhových anomálií neprojevuje (Výřez mapy vytvořen pomocí generátoru map SGU [13]).

Z měření magnetických anomálií v oblasti impaktního kráteru Siljan je zajímavý jediný rys, který je symetrický s jeho strukturou. Jedná se o pozitivní anomálii v centrální části kráteru s hodnotou amplitudy 500 nT a to s průměrem cca 10 km (obr. 4.28). Pokud jde o reliktní magnetické anomálie, nachází se zde několik drobných struktur, které jsou symetrické s tvarem impaktního kráteru (Henkel a Aaro 2005). Tyto struktury byly interpretovány jako důsledek žilných tvarů v podloží (Pedersen et al. 1990). Žíly vyvřelin pravděpodobně vyplnily dutiny, které vznikly narušením podloží samotnou impaktní událostí (Henkel a Aaro 2005).



Obr. 4.28 Zobrazení úplných magnetických anomálií v oblasti impaktní události Siljan. Centrální vrcholek tvoří s impaktním kráterem symetrickou anomálii o průměru přibližně 10 km a hodnotách okolo 500 nT (výřez mapy vytvořen pomocí generátoru map SGU [13]).

Seismický průzkum této lokality objevil několik odrazových ploch v horninovém podkladu, které byly Juhlinem a Pedersenem (1987, 1993) interpretovány buď jako doleritové hlubinné ložní žíly nebo jako dutiny vytvořené roztříštěním horninového podkladu impaktní událostí. Magnetotelurická měření prokázala existenci poměrně velké oblasti na severozápadní straně kráteru v nejsvrchnější vrstvě zemské kůry s nižší rezistivitou (1 k Ω m), než jsou normální hodnoty v okolí (10 k Ω m). Oblast nízké rezistivity má průměr asi 20 km (Zhang et al. 1988). Tento jev byl Henkelem a Aarem (2005) interpretován jako lokalita v horninovém masivu, která je postižena roztříštěním (brekciací způsobenou impaktní událostí), kde jsou postižené pórovité areály vyplněny podzemní vodou, což způsobuje nižší rezistivitu hornin.

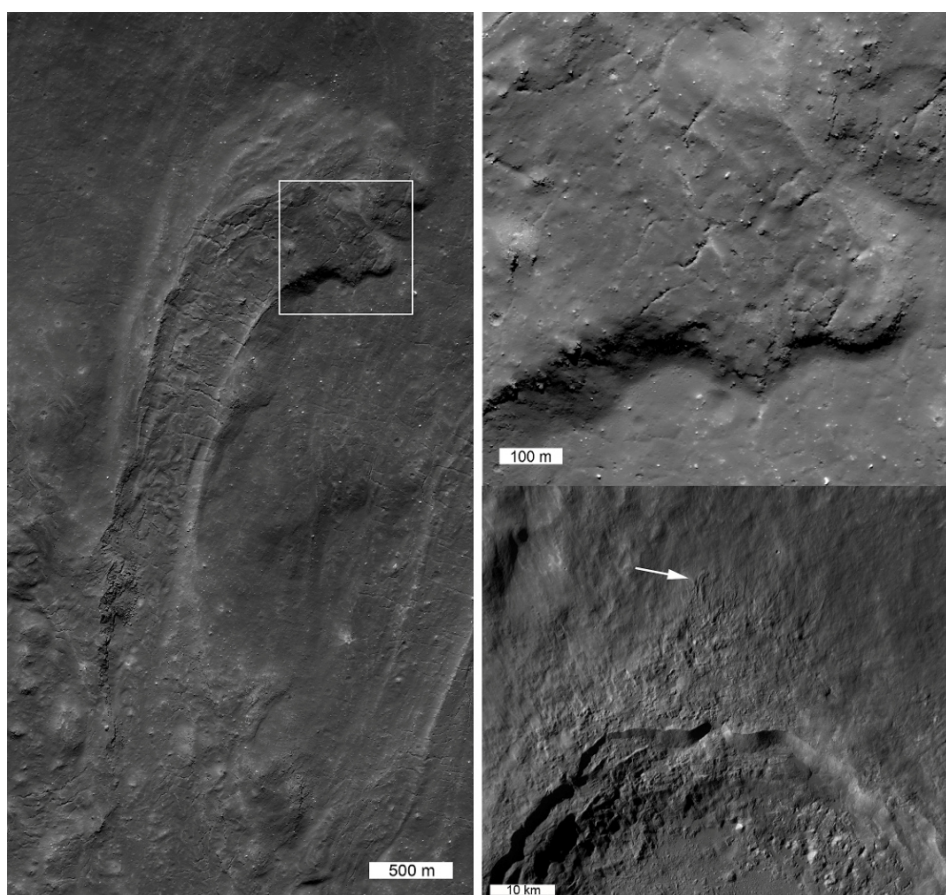
5. Diskuze

Siljanská morfostruktura má bezpochyby výrazné tvary impaktního původu. Podstatným dokladem této skutečnosti je zejména rozsáhlá kruhovitá deprese vyplněná sedimentárními horninami, které se nikde v širším okolí nenacházejí. Nálezy šokově metamorfovaných hornin (Svensson 1971) tuto hypotézu, o které se diskutovalo od prvního geologického průzkumu lokality (Fredriksson a Wickman 1963), nesporně potvrdily.

Impaktní kráter Siljan je unikátní jak rozsahem, tak významem pro poznávání paleogeografické historie Švédska. Impaktor, který vytvořil kráter Siljan, pohřbil mocné vrstvy sedimentárních hornin paleozoického stáří hluboko pod tehdejší povrch. Sedimentární horniny v podobě vápenců, pískovců a břidlic tak byly ochráněny před desítky milionů let probíhající erozí a denudací této části Baltského štítu, která exhumovala i prekambrické podloží. Výchozy paleozoických vápenců, pískovců a břidlic v kruhové depresi impaktního kráteru umožnily paleogeografickou rekonstrukcí přírodního prostředí Baltiky v paleozoiku. Impaktem „pohřbené“ paleozoické sedimentární horniny mohou být využity i pro odhad rozsahu denudace povrchu, která zde proběhla od vzniku impaktního kráteru. Zachovaná a prozkoumaná ordovická a silurská souvrství jsou mocná přibližně 500 m (250 m ordovik, 250 m silur; obr. 2.4; Thorslund 1985, Perhans 1988). Juhlin et al. (2012) však předpokládají, že ordovické souvrství je mocné nejméně 400 m, což dokazují hloubkovým seizmickým průzkumem nedaleko Mory. Z tohoto předpokladu pak vychází mocnost paleozoického souvrství před impaktem v devonu na nejméně 650 m.

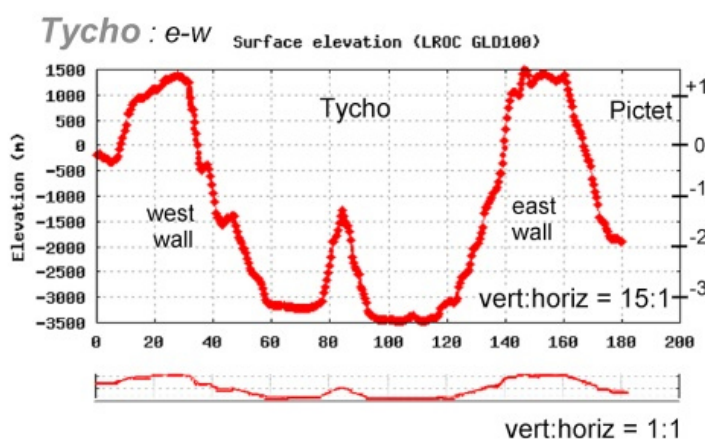
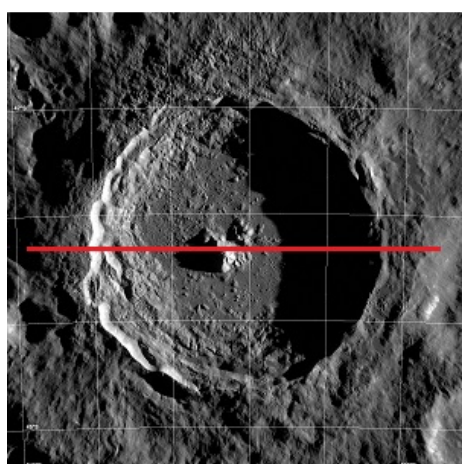
První odhady denudace v oblasti impaktního kráteru Siljan zveřejnil Rondot (1975). Odhadoval, že byl oderodován a odnesen horninový materiál o mocnosti 400 – 500 m, přičemž bral v úvahu pouze zachovalá silurská a ordovická souvrství. Přesnější odhad publikoval Collini (1988). V této práci mocnost oderodovaných horninových vrstev v oblasti kráteru Siljan odhadl na 1 – 2 km, přičemž vzal v úvahu nejen paleozoická souvrství, ale také kompletní vrstvu impaktní taveniny, která zde podle jeho odhadu měla mocnost nejméně 200 m. Collini však tyto odhady provedl v době, kdy se předpokládalo, že kráter Siljan měl původní rozměr 52 km určený Grievem (1988).

Po upřesnění velikosti impaktního kráteru Siljan Henkelem a Aarem (2005) až na předpokládaných 85 km je možné tento impaktní kráter dobře porovnat s přibližně stejně velkým impaktním kráterem Tycho na Měsíci, který má průměr právě 85 km [20]. Kráter Tycho vznikl přibližně před 108×10^6 lety (Bottke et al. 2007), přičemž se jedná o jeden z nejmladších velkých komplexních impaktních kráterů na Měsíci. Vzhledem k extrémně pomalým denudačním procesům, které na měsíčním povrchu probíhají (Lulák 2012), kráter Tycho představuje možný pohled na situaci, jakou stavbu hornin a reliéf měl kráter Siljan po jeho vzniku. Na povrchu Tychona lze pozorovat proudy impaktní taveniny (obr. 5.1), chaotický reliéf rychle utuhnutého povrchu, terasovité plochy na kráterovém lemu a další velmi zachovalé tvary impaktního původu. Tyto charakteristické rysy jsou již na většině pozemských impaktních struktur, včetně lokality Siljanu, zničeny erozí a denudací.



Obr. 5.1 Mohutný proud impaktní taveniny, který stekl ze severního okraje kráterového lemu Tychona. Obrázek vpravo dole zobrazuje jeho polohu oproti kráteru Tycho a lze na něm pozorovat i terasovité valy na kráterovém lemu. Obrázek vlevo zobrazuje samotný proud a místo, kde utuhnul natolik, že přestal téct. Obrázek vpravo nahoře je výřez obrázku vlevo – detail konce proudu a jeho chaotické rozpraskané struktury. K deformacím a tvorbám puklin v impaktní tavenině docházelo během tuhnutí a to především teplotními kontrakcemi. Na měsíční poměry relativní mládí tohoto proudu dokazuje i minimum impaktních kráterů na jeho povrchu ([22]; Lunar Reconnaissance Orbiter – NASA).

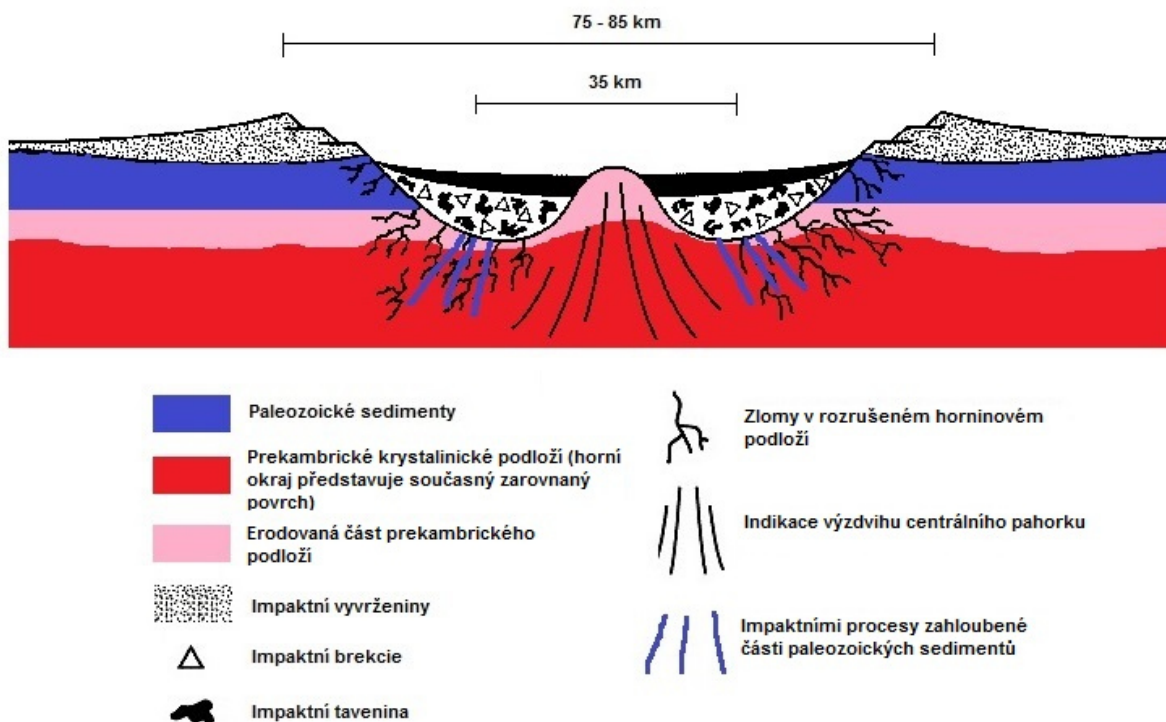
Odhady denudace a eroze v oblasti impaktního kráteru Siljan byly prozatím vždy vytvářeny pouze na základě nekompletního záznamu exhumovaných krystalinických hornin a dodnes zachovaných paleozoických sedimentů. Impaktní kráter Tycho svou velikostí a zachovalostí může velmi dobře posloužit jako tzv. analog, podle kterého by se dal upřesnit tento odhad denudace. Topografie kráteru Tycho na Měsíci (obr. 5.2) svědčí o tom, že impaktní kráter odpovídající velikosti je vůči svému okolnímu povrchu zahlouben do horninového základu přibližně o 3 – 3,5 km. Jeho miskovitý tvar navíc určuje, že jeho dno je pokryto ještě vrstvou impaktní taveniny a impaktních brekcií o mocnosti přibližně 1 km.



Obr. 5.2 Povrchové převýšení v měsíčním kráteru Tycho. Horní část grafu je zobrazena s 15násobným převýšením osy y vůči ose x. Dolní část grafu je v poměru 1:1. Z grafu je patrné, že kráter Tycho je oproti okolnímu povrchu hluboký přibližně 3 – 3,5 km. Tvar kráteru ukazuje, že se na dně kráteru nachází vrstva impaktní taveniny a brekcií o mocnosti ještě přibližně 1 km (graf upraven z [24], použitá data z [25], fotografie vlevo pořízena sondou NASA – Lunar Reconnaissance Orbiter [26]).

Z téměř úplné absence impaktní taveniny a impaktních brekcií na současném povrchu impaktního kráteru Siljan lze odvodit, že vrstva těchto impaktem nejvíce postižených a deformovaných hornin musela být v minulosti kompletně oderodována (obr. 5.3). Přítomnost tříštivých kuželů přímo na současném povrchu potvrzuje, že muselo dojít i k částečné erozi a denudaci prekambriického krystalinického základu. Tříštivé kužele totiž vznikají dále od epicentra výbuchu, a to především pod centrálním pahorkem nebo v jeho blízkém okolí (French 1998). Pokud se tedy tato situace porovná s podobně velkým kráterem Tycho na Měsíci a jeho rozměry vůči bezprostřednímu okolí, vychází odhad mocnosti materiálu, který byl z oblasti impaktního kráteru Siljan odnesen erozivními a denudačními procesy, nejméně na 4 km, možná až 4,5 – 5 km. Hlavní nepřesnosti odhadu ovšem spočívají v odlišném horninovém složení oblasti Siljanu a Tychona, přičemž určitý

vliv by měly mít i samotné impaktory, jejich rychlost, složení a úhly dopadu na zemský, resp. měsíční povrch.

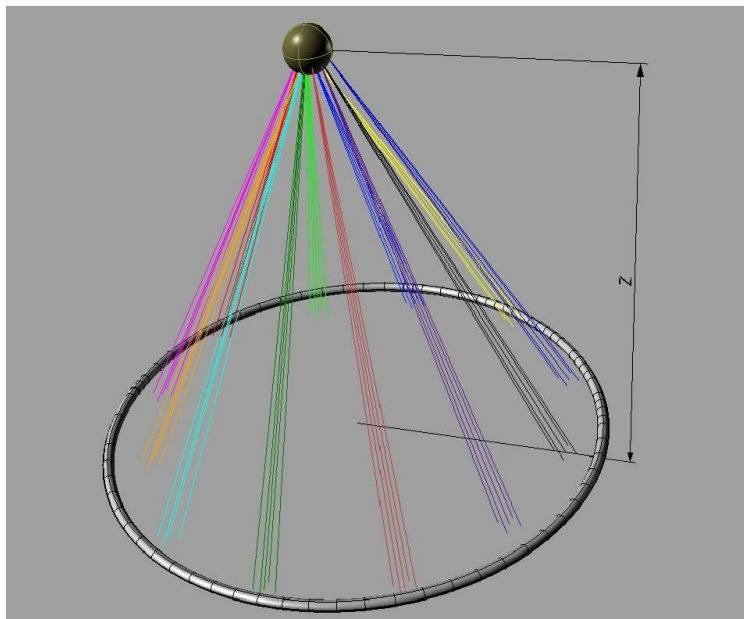


Obr. 5.3 Pravděpodobná podoba impaktního kráteru Siljan s průměrem 75 – 85 km nedlouho po jeho vzniku. Horní okraj červené části profilu reprezentuje současný zarovnaný povrch. Osa y je zkreslená (několikrát zvětšená), aby byly dobře viditelné jednotlivé vrstvy. Impaktor deformoval souvrství paleozoických sedimentů, které měly mocnost nejméně 650 m a svým účinkem narušil i krystalinické podloží prekambričského stáří. Během výzdvihu centrálního pahorku byla velká část paleozoických sedimentů pohřbena hluboko pod povrch. Tyto partie jsou ve schématu zachyceny modrými liniemi. Různorodé horninové složení oproti zbytku tvrdšího krystalinického podloží ovlivnilo dnešní podobu reliéfu kráteru Siljan, kdy rychleji erodovatelné paleozoické sedimenty vytvořily kruhovitou depresi, která je z části vyplněna jezerními pánvemi o průměru cca 35 km (autorem upravený obrázek z [12]).

Z uvedené interpretace tohoto porovnání je zřejmé, že v současnosti pozorovatelné mocnosti paleozoických hornin o mocnosti přibližně 650 m určitě neodpovídají původní mocnosti sedimentů, které se v této části Baltského štítu nacházely v době vzniku impaktního kráteru Siljan. Původní mocnost těchto sedimentárních hornin, které impaktor rozrušil, byla podstatně větší.

Další možností, jak zjistit kolik horninového materiálu bylo denudováno v oblasti impaktního kráteru Siljan, by mohlo být studium tříštivých kuželů, které se v místních horninách poměrně často vyskytují (viz podkapitola 4.2). Tříštivé kužele mají totiž zajímavé geometrické resp. strukturní uspořádání. Vrcholy kuželů deformací v hornině ukazují směrem k epicentru výbuchu, který impaktní kráter způsobil. Pokud se podaří nalézt další odkryvy hornin s dostatečným počtem tříštivých kuželů *in situ*, bude možné

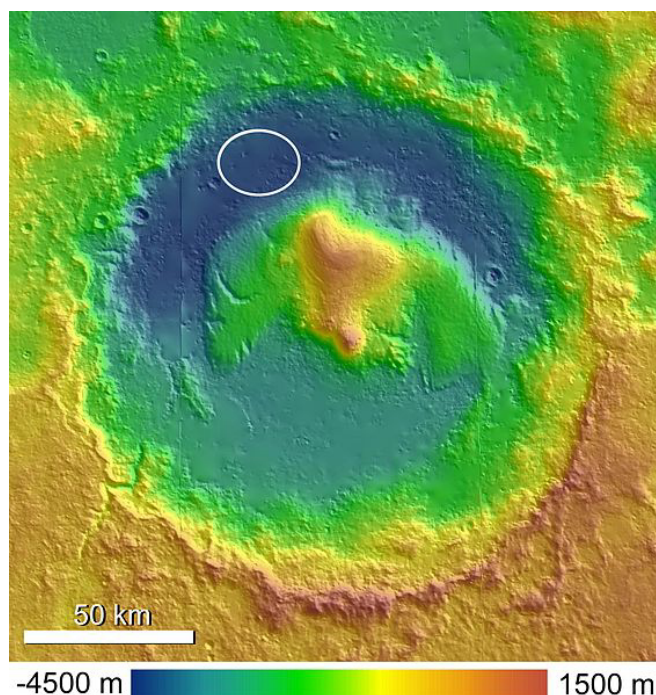
pomocí změření úhlů směru těchto kuželů rekonstruovat přibližnou polohu povrchu (viz obr. 5.4) při dopadu impaktoru v devonu.



Obr. 5.4 Grafické znázornění navrhované metodiky odhadu denudace pomocí směru tříštivých kuželů. Stříbrný kruh představuje současný povrch impaktního kráteru. Jednotlivé barevně odlišené přímky znázorňují změřené směry tříštivých kuželů v místech předpokládaných lokalit. Zelenohnědá koule představuje pravděpodobné místo epicentra výbuchu impaktoru a tedy i výšku tehdejšího povrchu. Osa z je oproti osám x a y pro přehlednost několikrát převýšena. Situace na obrázku je samozřejmě pouze ideální stav s dostatečným počtem míst s tříštivými kužely, které jsou navíc v polohách málo postižených tektonickými procesy. Tento způsob dokumentace rozsahu a mocnosti denudace je ovšem přibližný. Závisí na počtu možných měření a tektonické situaci, přesto by mohl být využit k odhadu mocnosti povrchových vrstev, které byly v průběhu milionů let denudovány (obrázek byl vytvořen pomocí programu Rhinoceros 4.0).

Při pohledu na centrální vrcholek kráteru Siljan, který je v současné době vyšší, než nynější kráterový lem (obr. 4.26), je zajímavé srovnání s morfologií impaktního kráteru Gale na Marsu. Stáří kráteru Gale se odhaduje na 3,8 až 3,5 miliardy let [21]. Podle jeho průměru 154 km (Anderson a Bell 2010) se jedná o zástupce větších komplexních kráterů, než je pozemský Siljan. Jeho podobnost ale spočívá v tom, že má stejně jako Siljan v současné době vyšší centrální vrcholek, než kráterový lem (obr. 5.5). Oba případy vysokých centrálních pahorků však mají jiný původ. Vyvýšenina v centru impaktního kráteru Siljan je již pouze reliktem původního centrálního vrcholku. Vzhledem k hluboké denudaci a erozi v místě této impaktní události je nynější vrchol tohoto pahorku místem, které leželo pravděpodobně 4 – 5 km pod původním centrálním vrcholkem v době vzniku impaktního kráteru Siljan. Gale na Marsu má naopak i přes své stáří stále zřetelné všechny rysy impaktního kráteru. O důvodech, proč je centrální vrcholek kráteru Gale vyšší než

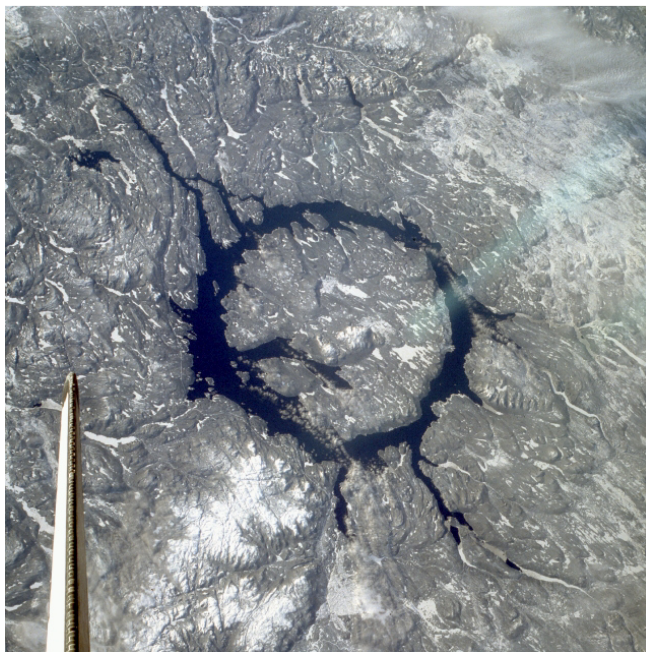
kráterový lem, se dosud pouze spekuluje. Jedna z možností podle předpokladů Kiteho et al. (2013) je v silném proudění katabatických větrů, které postupně navály velké množství sedimentů okolo původního centrálního vrcholku. Další potřebné informace o příčinách vzniku mohutného centrálního vrcholku v impaktním kráteru Gale by měla v budoucnu přinést americká sonda Curiosity (Mars Science Laboratory), která se od roku 2012 v oblasti tohoto kráteru pohybuje.



Obr. 5.5 Topografická mapa kráteru Gale vytvořená pomocí vědeckého přístroje High Resolution Stereo Camera na palubě evropské vesmírné sondy Mars Express. Na této mapě lze pozorovat mohutný centrální vrcholek, který svým vrcholem přesahuje i velkou část kráterového lemu. Bílá elipsa znázorňuje přibližnou polohu místa přistání sondy NASA Curiosity (Mars Science Laboratory), která zde přistála v srpnu 2012 (Anderson a Bell 2010, Mars Express – ESA).

Impaktní kráter Siljan ve Skandinávii má také velmi podobný charakter jako impaktní kráter Manicouagan ležící v Kanadě. Je zajímavé, že impaktní kráter Manicouagan má nejen podobný původní průměr (~ 90 km; O'Connell-Cooper a Spray 2011, O'Connell et al. 2012), ale je umístěn i v paleogeograficky a geograficky podobných podmínkách. Jeho radiometrické stáří z analýz zirkonů pomocí rozpadové řady U-Pb určili Hodych a Dunning (1992) na $214 \pm 1 \times 10^6$ let. Přestože je Manicouagan o více než 150 milionů let mladší než Siljan, jsou jeho morfostruktury také hluboce denudovány a relikty jeho reliéfu v podobě kruhové deprese jsou zdůrazněny komplexem jezerem a uspořádáním říční sítě (obr. 5.6). Oblast impaktního kráteru Manicouagan se stejně jako

oblast impaktního kráteru Siljan v kvartéru opakovaně nacházela pod kontinentálním ledovcem s odpovídajícím vývojem současných povrchových tvarů.



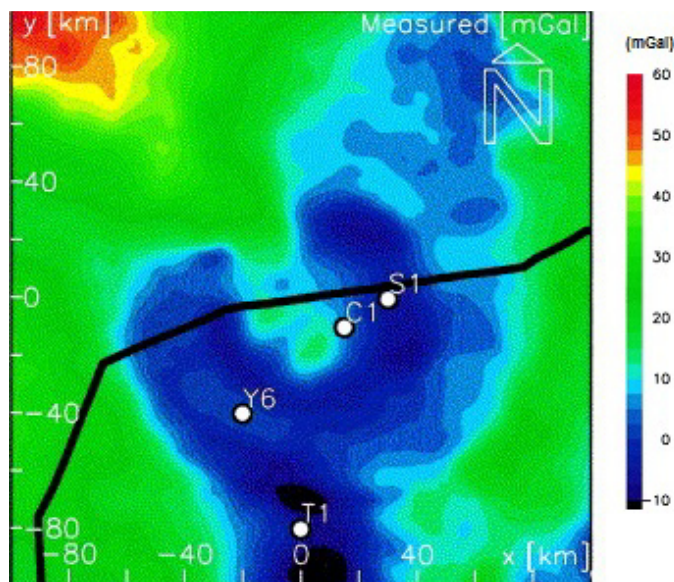
Obr. 5.6 Hlavní geomorfologické rysy Impaktního kráteru Manicouagan v Kanadě zachycené z oběžné dráhy posádkou raketoplánu NASA STS-9 Columbia (NASA; [27]).

Podobností mezi Siljanským a Manicouaganským impaktním kráterem je však více. Dříve byl kráter Manicouagan dáván do souvislosti s velkým vymíráním organismů na přelomu triasu a jury (Hordych a Dunning 1992), kdy vymizelo takřka 48 % všech živočichů na Zemi (Ryder et al. 1996). Později se však dalšími výzkumy zjistilo, že impaktní kráter Manicouagan je o více než 10 milionů let starší. Přesto se však na vymírání organismů na přelomu triasu a jury pravděpodobně podílela jiná impaktní událost, např. vznik impaktního kráteru Rochechouart v západní Francii (201 milionů let BP; Schmieder et al. 2010). Kráter Rochechouart je však poměrně malý, protože jeho původní velikost nebyla větší než 50 km v průměru (Smith 2011). Práce Spray et al. (1998) předpokládá, že Manicouagan a Rochechouart jsou stejně staré a vznikly současně jako součást několikanásobného impaktu, a to spolu s krátery Saint Martin v Manitobě, Obolon na Ukrajině a Red Wing v Severní Dakotě, způsobeného fragmenty planetky nebo komety. Spray et al. se vyjádřili (1998), že pravděpodobnost, aby tolik velkých impaktních kráterů leželo v takové paleogeografické pozici a v podobném časovém rozmezí je blízka nule. Tyto krátery totiž leží na linii, pokud se vezme do úvahy rekonstrukce jejich polohy před 200 miliony lety. Poukazují také na to, že podobná situace není ve sluneční soustavě

ojedinělá, což dokazují jak tzv. kráterovými řetězy na Měsíci či Jupiterově měsíci Ganymedu, ale i dopadem rozpadlého jádra komety Shoemaker-Levy 9 do atmosféry Jupiteru v podobě 21 fragmentů v roce 1994.

V oblasti impaktního kráteru Siljan došlo za více než 370 milionů let k oderodování možná až 5 km mocné vrstvy hornin. Přesto však zůstaly v této oblasti morfologické a geologické reliktů samotné impaktní události. Jedná se zejména o kruhové megastruktury, které tvoří nyní kruhovitá deprese a relikt centrálního pahorku v centrální části impaktní struktury. V místě impaktní události Siljan se zachovaly i mikrostruktury v podobě tříštivých kuželů v místních granitových horninách a velmi vzácné, ale přesto spolehlivě zjištěné, impaktní brekcie (Reimold et al. 2005a).

Je zajímavé, že přes svou velikost nezanechal kráter Siljan v horninovém podloží výraznější geofyzikální projev v podobě tíhových anomálií (viz kapitola 4.2). Naopak např. rozsáhlý impaktní kráter Chicxulub svrchně křídového stáří na Yucatánu v zobrazení tíhových Bouguerových anomálií zřetelně vystupuje jako kruhovitá struktura a je možné identifikovat i centrální pahorek (obr. 5.7). A to i přesto, že již není na současném povrchu přímo pozorovatelný, protože je pohřben mocnou vrstvou sedimentů a proto byl objeven až geofyzikálním průzkumem v polovině 80. let (Hildebrand et al. 1991).



Obr. 5.7 Zobrazení Bouguerových tíhových anomálií v oblasti impaktního kráteru Chicxulub. V porovnání se stejnými anomáliemi měřenými v oblasti kráteru Siljan (obr. 4.27) je zřejmé, že Chicxulub je mnohem lépe patrný a i rozdíly v mGal jsou větší. Tento kráter, který je pravděpodobně hlavním důvodem vymření až 75 % všech pozemských organismů, dopadl na poloostrov Yucatán na přelomu křídý a paleogénu před $66,038 \times 10^6$ lety (Renne et al. 2013). Černá linie na mapě zobrazuje pobřežní linii mezi Yucatánem (dole) a Mexickým zálivem (obrázek z Ebbing et al. 2001).

V podkapitole 3.2 a zde jsou zmíněné hypotézy o možné souvislosti mezi vznikem impaktního kráteru Siljan a velkém vymírání organismů v pozdním devonu na přelomu stupňů frasn a famen (dále F/F; např. McGhee 1982, 1996, Goehring 2001, Reimold et al. 2005a a další). Vymírání organismů v devonu na přelomu F/F však není vysvětlováno pouze jako událost způsobená velkou impaktní událostí. Během let od jeho objevení, bylo publikováno mnoho názorů, které se snažily tuto událost vysvětlit. Jedna z hypotéz přisuzuje vymírání organismů rychlému globálnímu ochlazení klimatu, které mělo způsobit uzavření praoceánu mezi Laurásií a Gondwanou. K tomuto mělo dojít právě na hranici mezi F/F (Cooper 1986), i když další autoři poukazují, že tyto procesy proběhly až v karbonu (McGhee 1989). Uzavřením praoceánu mělo dojít k přerušení globální cirkulace teplé vody v mírných šířkách. Studená voda z vyšších zeměpisných šířek poté mohla protékat do rovníkových šířek a vytvořit anoxické podmínky v dřívějších teplejších vodách [8] a také podpořit globální ochlazení klimatu (Cooper 1986). Uváděné možnosti byly dokládány také objevením vyššího zastoupení studenomilných organismů (např. některých druhů křemitých hub třídy *Hexactinellida*) v nižších zeměpisných šířkách během přelomu F/F (McGhee 1982). Ochlazení světových oceánů v té době mohlo být spojeno i se zaledněním v Jižní Americe (Rossbach a Hall 1998), jehož sedimentární relikty byly nalezeny v Amazonské nížině (Caputo a Crowell 1985). Je však nutné poznamenat, že jiné hypotézy naopak spekulují o náhlém zvýšení teploty globálního klimatu (McGhee 1996), o zvýšení vulkanické aktivity, což by ovlivnilo složení atmosféry a tedy i vlhkost a teplotu klimatu (McGhee 1996), dále rychlých změnách výšky hladiny celosvětového oceánu (Johnson 1974, McGhee 1982, 1989, Walliser 1996), nebo náhlé eutrofizaci mořských vod (Goehring 2001).

Nedávno bylo navíc upřesněno datování přelomu F/F na $372,2 \pm 1,6 \times 10^6$ let [23], což ovlivňuje hypotézu Reimolda et al. (2005a), kteří předchozí publikované stáří přelomu F/F ($374,5 \pm 2,6 \times 10^6$ BP; Gradstein a Ogg 2004, Gradstein et al. 2004) korelovali s jejich zjištěným stářím impaktní struktury Siljan ($377 \pm 2 \times 10^6$ let) a spekulovali o jejím možném spojení s vymíráním organismů na přelomu F/F. Ani to však nevylučuje, že by impaktní událost Siljan mohla mít souvislost s popsáním velkým vymírání organismů v pozdním devonu. Jak popisuje např. McGhee (1996), velké vymírání organismů je dlouhodobý proces, kdy došlo k vymření aspoň 15 % všech pozemských organismů během 15×10^6 let. Je tedy pravděpodobné, že impaktor, který vytvořil kráter Siljan, sice nebyl primární

příčinou vymírání organismů na přelomu F/F, ale mohl být součástí řady podnětů pro spuštění katastrofických procesů, které nesporně způsobily jedno z pěti největších známých vymírání organismů v geologické historii planety Země.

6. Závěry

Impaktní kráter Siljan ve středním Švédsku, který vznikl v pozdním devonu, je dosud největší zjištěná morfostrukura tohoto druhu v Evropě. Předložená práce se zabývá vývojem reliéfu v lokalitě impaktního kráteru Siljan. Byly studovány povrchové tvary tohoto území, včetně reliktních impaktní události a popsány hlavní etapy vývoje reliéfu od paleozoika do současnosti. Interpretací terénních a dosud publikovaných analytických údajů byly stanoveny morfologické charakteristiky paleogeografické historie oblasti impaktního kráteru Siljan. Dále byl identifikován rozsah a typy erozních a denudačních procesů ve vztahu ke stupni zachování morfologických a geologických indicií tohoto devonského impaktu.

Vývoj reliéfu v lokalitě kráteru Siljan byl charakterizován ve čtyřech hlavních etapách: *i) Období před impaktní událostí – od vzniku kontinentu Baltiky v prekambriu až do pozdního devonu; ii) Období během vzniku impaktního kráteru (přelom frasnů a famenu) v pozdním devonu; iii) Období od konce pozdního devonu až do konce pliocénu; iv) Kvartérní období včetně současnosti.*

První a nejdelší období zahrnuje vývoj prehistorického kontinentu Baltiky, na kterém se střední Švédsko nachází, od prekambria až do pozdního devonu. V tomto období vznikl prekambriový fundament oblasti v podobě krystalinických (zejména granitových) hornin a proběhlo několik orogenetických fází, jejichž geologické struktury byly následně hluboce denudovány. Na konci této etapy během středního paleozoika, kdy se oblast ocitla pod mořskou hladinou, vznikaly sedimentární horniny spočívající na prekambriovém fundamentu.

Během druhé etapy se studovaná oblast Siljan ocitla opět nad mořskou hladinou a koncem devonu na ni dopadl impaktor, který vytvořil rozsáhlý kráter. Tato katastrofická etapa zahrnuje především vznik všech tvarů a struktur, které jsou s významnou impaktní událostí spojeny. V současném přírodním prostředí lokality byly identifikovány zejména relikty impaktních brekcií, četných zlomových struktur v původním prekambriovém podloží a morfologicky výrazné terasovité valy kráterového lemu a centrální pahorek. Dále od epicentra dopadu impaktoru vznikly v zasažených horninách kromě zlomů a dalších strukturních deformací také výrazné tříštivé kužely. Relikty v podobě impaktní taveniny a vyvrženin z této doby se identifikovat nepodařilo.

Třetí období zahrnuje paleogeografický vývoj této oblasti během téměř 370 milionů let. V tomto období probíhala především dlouhodobá a velmi rozsáhlá eroze a denudace. Byla exhumována nižší patra granitoidního horninového fundamentu a zároveň bylo téměř úplně odstraněno sedimentární nadloží této části Baltického štítu. Během neogénu byla v oblasti Siljan dotvářena epeirogenetickými a erozně-denudačními procesy (preglaciální) zarovnaná úroveň typu etchplén, která exhumovala nižší patra geologické stavby než starší zarovnané úrovně. Ve svrchně paleozoické až pliocenní etapě vývoje reliéfu tak došlo k denudaci a odnosu převážné většiny hornin a tvarů vzniklých během impaktní události.

Čtvrtá etapa zahrnuje kvartérní vývoj reliéfu v lokalitě Siljan. Předkvartérní povrchové tvary byly přemodelovány především erozní činností pevninských ledovců během pleistocénních glaciálů a velmi rozmanitými periglaciálními procesy v interglaciálech. V současné době lze v lokalitě Siljan dokumentovat zejména polygenetické povrchové tvary z pozdního pleistocénu a holocénu. Pozůstatky pleistocénního permafrostu v přípovrchové části hluboce fyzikálně zvětralých krystalinických hornin a paleozoických sedimentů a na akumulacích povrchových tvarech kvartérního stáří nebyly zjištěny. Pro recentní klimato-morfogenetické procesy je charakteristická fluvialní eroze a akumulace, periglaciální svahové procesy a jevy, včetně vývoje podzolovitých půd a souvislého pokryvu boreálních jehličnatých lesů.

Je vhodné zdůraznit, že v lokalitě impaktní události Siljan se i přes její poměrně vysoké geologické stáří zachoval rozsáhlý soubor vzácných geologických a geomorfologických reliktních tohoto katastrofického jevu. V současné době však na tomto území probíhá intenzivní těžba granitových hornin, v nichž jsou zachovány i mikrostruktury tříštivých kuželů. Dochází zde tedy k ničení těchto unikátních svědectví impaktu, které jsou dosud popsány pouze na několika dalších lokalitách impaktních kráterů. Ochrana těchto přírodních útvarů a všech dalších reliktních impaktní události Siljan má být jedním z hlavních úkolů nově vznikajícího geoparku Meteorum.

Vybrané příklady a porovnávání účinků významných impaktních událostí nejen z dávné historie Země a těles sluneční soustavy, ale také z posledních desetiletí, např. Tunguzská událost na začátku minulého století či dopad komety Shoemaker-Levy 9 v roce 1994 do atmosféry Jupitera, dokládají nezbytnost systematických výzkumů těchto náhlých katastrofických jevů a s nimi spojených přírodních procesů.

Seznam použité literatury

Literatura

ÅBERG, G., BOLLMARK, B. (1985): Retention of U and Pb in zircons from shocked granite in the Siljan impact structure, Sweden. *Earth and Planetary Science Letters*, 74, 347-349.

ADACHI, T., KLETETSCHKA, G. (2008): Impact-pressure controlled orientation of shatter cone magnetizations in Sierra Madera, Texas, USA. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 52, 237-254.

AGER, D. V. (1980): *The Geology of Europe*. McGRAW HILL Book Company (UK), Maidenhead, 535 p.

ALVAREZ, L. W., ALVAREZ, W., ASARO, F., MICHEL, H. V. (1980): Extraterrestrial Cause for the Cretaceous-Tertiary Extinction. *Science*, 208, 1095-1108.

ANDERSON, R. B., BELL, J. F. (2010): Geologic mapping and characterization of Gale Crater and implications for its potential as a Mars Science Laboratory landing site. *Mars*, 5, 76-128.

BOTTKE, W. F., VOKROUHLICKÝ, D., NESVORNÝ, D. (2007): An asteroid breakup 160 Myr ago as the probable source of the K/T impactor. *Nature*, 449, 48-53.

BOTTOMLEY, R. J., YORK, D., GRIEVE, R. A. F. (1978): ^{40}Ar - ^{39}Ar ages of Scandinavian impact structures: I. Mien and Siljan. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 68, 79-84.

BRUNSELL, M. (2005): Geological sights to visit in Rättvik municipality. Environment and Planning Office, Rättvik municipality, 10 p.

BUNCH, T. E., QUAIDE, W. L. (1968): Shatter cones from the Danny Boy nuclear crater. In *Shock Metamorphism of Natural Materials*, ed. FRENCH, B. M., SHORT, N. M. Mono Book Corp., Baltimore, 644 p.

CAPUTO, M., CROWELL, J. C. (1985): Migration of glacial centers across Gondwana during Paleozoic Era. *Geological Society of America Bulletin*, 96, 1020-1036.

- CLAEYS, P., CASIER, J-G., MARGOLIS, S. (1992): Microtektites and Mass Extinctions: Evidence for a Late Devonian Asteroid Impact. *Science*, 257, 1102-1104.
- CLAEYS, P., CASIER, J-G. (1994): Microtektite-like impact glass associated with the Frasnian-Famennian boundary mass extinction. *Earth and Planetary Science Letters*, 122, 303-315.
- CLARK, P. U., DYKE, A. S., SHAKUN, J. D., CARLSON, A. E., CLARK, J., WOHLFARTH, B., MITROVICA, J. X., HOSTETLER, S. W., McCABE, A. M. (2009): The Last Glacial Maximum. *Science*, 325, 5941, 710-714.
- COLLINI, B. (1988): Geological setting of the Siljan ring structure. In: *Deep Drilling in crystalline bedrock, volume 1: The deep gas drilling in the Siljan impact structure, Sweden and astroblemes*, ed. BODÉN, A., ERIKSSON, K. G., Springer-Verlag, Berlin, 364 p.
- COOPER, P. (1986): Frasnian/Famennian mass extinction and cold-water oceans. *Geology*, 14, 835-839.
- DAVIS, G. H., REYNOLDS, S. J. (1996): *Structural Geology of Rocks and Regions*, 2nd Edition. Wiley, West Wessex, 800 p.
- DIETZ, R. S. (1959): Shatter cones in cryptoexplosion structures (meteorite impact?). *Journal of Geology*, 67, 476–506.
- DIETZ, R. S. (1968): Shatter cones in cryptoexplosion structures. In: *Shock Metamorphism of Natural Materials*, ed. FRENCH, B. M., SHORT, N. M. Mono Book Corp., Baltimore, 644 p.
- DYDVIK, H., PLADO, J., HEINBERG, C., HÅKANSSON, E., PESONEN, L. J., SCHMITZ, B., RAISKILA, S. (2008): Impact structures and events – a Nordic perspective. *Episodes*, 31, 1, 107-113.
- EBBING, J., JANLE, P., KOULOURIS, J., MILKEREIT, B. (2001): 3D gravity modelling of the Chicxulub impact structure. *Planetary and Space Science*, 49, 6, 599-609.
- FREDRIKSSON, K., WICKMAN, F. E. (1963): Meteorites. *Svensk Naturvetenskap*, 16, 121-157.

- FRENCH, B. M. (1998): *Traces of Catastrophe: A Handbook of Shock-Metamorphic Effects in Terrestrial Meteorite Impact Structures*. Lunar and Planetary Institute, Houston, 120 p.
- GAAL, G., GORBATSCHEV, R. (1987): An Outline of the Precambrian Evolution of the Baltic Shield, *Precambrian Research*, 35, 15–22.
- GLASS, B. P., SIMONSON, B. M. (2012): *Distal Impact Ejecta Layers: A Record of Large Impacts in Sedimentary Deposits*. Springer, London, 716 p.
- GOEHRING, S. (2001): The Late Devonian Mass Extinction Event. *Geology, Paleontology*, 345, 1-12.
- GOLD, T., SOTER, S. (1980): The deep gas hypothesis. *Scientific American*, 242, 154-161.
- GRADSTEIN, F. M., OGG, J. G. (2004): Geologic Time Scale 2004 – Why, how and where next! *Lethaia*, 37, 175-181.
- GRADSTEIN, F. M., OGG, J. G., SMITH, A. G., BLEEKER, W., LOURENS, L. J. (2004): A new geologic time scale, with special reference to Precambrian and Neogene. *Episodes*, 27, 83-100.
- GRIEVE, R. A. F. (1988): The formation of large impact structures and constraints on the nature of Siljan. In: *Deep Drilling in crystalline bedrock, volume 1: The deep gas drilling in the Siljan impact structure, Sweden and astroblemes*, ed. BODÉN, A., ERIKSSON, K. G., Springer-Verlag, Berlin, 364 p.
- GRIEVE, R. A. F., MASAITIS, V. L. (1994): The economic potential of terrestrial impact craters. *International Geology Review*, 36, 105–151.
- HARTMANN, W. K. (1999): *Small Worlds: Patterns and Relationships*. In: *The New Solar System*, ed. BEATTY, J. K., PETERSEN, C. C., CHAIKIN, A. Cambridge Press, Cambridge, 421 p.
- HARTMANN, W., K. (2005): *Moons & Planets*. Brooks/Cole, Belmont, 428 p.
- HENKEL, H., AARO, S. (2005): Geophysical investigations of the Siljan impact structure: A review. In: *Impact Tectonics*, ed. KOEBERL, C., HENKEL, H., Springer-Verlag, Berlin, 552 p.

HILDEBRAND, A. R., PENFIELD, G. T., KRING, D. A., PILKINGTON, M., ZANOQUERA, A. C., JACOBSEN, S. B., BOYNTON, W. V. (1991): Chicxulub Crater: A possible Cretaceous/Tertiary boundary impact crater on the Yucatán Peninsula, Mexico. *Geology*, 19, 9, 867–871.

HODYCH, J. P., DUNNING, G. R. (1992), Did the Manicouagan impact trigger end-of-Triassic mass extinction? *Geology*, 20, 51–54.

JACOBS, T. (2014): Ústní sdělení, srpen/září 2014, Rättvik, Švédsko.

JOHNSON, J. G. (1974): Extinction of Perched Faunas. *Geology*, 2, 479-482.

JUHLIN, C., PEDERSEN, L. B. (1987): Reflection seismic investigations of the Siljan impact structure, Sweden. *Journal of Geophysical Research*, 92, 14113-14122.

JUHLIN, C. (1991): Scientific summary report of the Deep Gas Drilling Project in the Siljan ring structure. Swedish State Power Board U(G), 1991/14, 357 p.

JUHLIN, C., PEDERSEN, L. B. (1993): Further constraints on the formation of the Siljan impact crater from seismic reflection studies. *Geologiska Föreningens i Stockholm Föreläsningar*, 115, 151-158.

JUHLIN, C., STURKELL, E., EBBESTAD, J. O. R., LEHNERT, O., HÖGSTRÖM, A. E. S., MEINHOLD, G. (2012): A new interpretation of the sedimentary cover in the western Siljan Ring area, central Sweden, based on seismic data. *Tectonophysics*, 580, 88-99.

KELLY, A. O., DACHILLE, F. (1953): *Target: Earth. The Role of Large Meteors in Earth Science*. Carlsbad, California, 263 p.

KENKMANN, T., von DALWIGK, I. (2000): Radial transpression ridges: A new structural feature of complex impact craters. *Meteoritics & Planetary Science*, 35, 1189-1201.

KITE, E. S., LEWIS, K. W., LAMB, M. P., NEWMAN, C. E., RICHARDSON, M. I. (2013): Growth and form of the mound in Gale Crater, Mars: Slope wind enhanced erosion and transport. *Geology*, 41, 5, 543-546.

KRÁL, V. (1999): *Fyzická geografie Evropy*. Academia, Praha, 348 p.

LINDÉN, M. (2006): Glaciodynamics, deglacial landforms and isostatic uplift during the last deglaciation of Norrbotten, Sweden. Abstract of Doctoral dissertation, Lund University, 29 p.

LULÁK, M. (2012): Přírodní prostředí Měsíce. Bakalářská práce, Univerzita Karlova v Praze, 85 p.

McGHEE, G. R. (1982): The Frasnian-Famennian extinction event: A preliminary analysis of Appalachian marine ecosystems. *Geologic Society of America*, 5, 491-500.

McGHEE, G. R. (1989): The Frasnian-Famennian Extinction Event. In: *Mass Extinctions: Processes and Evidence*, ed. DONOVAN, S. K. Columbia University Press, New York, 266 p.

McGHEE, G. R. (1996): The Late Devonian Mass Extinction: The Frasnian/Famennian Crisis. Columbia University Press, New York, 303 p.

MILTON, D. J. (1977): Shatter cones – An outstanding problem in shock mechanics. In: *Impact and Explosion Cratering: Planetary and Terrestrial Implications*, ed. RODDY, D. J., PEPIN, R. O., MERRILL, R. B. Pergamon, New York, 1301 p.

NICOLAYSEN, L. O., REIMOLD, W. U. (1999): Vredefort shatter cones revisited. *Journal of Geophysical Research* 104, B3, 4911-4930.

O'CONNELL-COOPER, C. D., SPRAY, J. G. (2011): Geochemistry of the impact-generated melt sheet at Manicouagan: Evidence for fractional crystallization. *Journal of Geophysical Research*, 116, 1-22.

O'CONNELL-COOPER, C. D., DICKIN, A. P., SPRAY, J. G. (2012): The Manicouagan impact melt sheet: Evidence for isotopic homogenization with limited assimilation. *Earth and Planetary Science Letters*, 335, 48-58.

PEDERSEN, L. B., RASMUSSEN, T. M., DYRELIUS, D. (1990): Construction of component maps from aeromagnetic total field anomaly maps. *Geophysical Prospecting*, 38, 795-804.

PEEL, M. C., FINLAYSON, B. L., McMAHON, T. A. (2007): Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11, 1633-1644.

PERHANS, K.-E. (1988): Berg och jord i Siljansringen. Sveriges Geologiska Undersökning, Stockholm, 96 p.

REIMOLD, W. U., KELLEY, S. P., SHERLOCK, S. C., HENKEL, H., KOEBERL, C. (2005a): Laser argon dating of melt breccias from the Siljan impact structure, Sweden: Implications for a possible relationship to Late Devonian extinction events. *Meteoritics & Planetary Science*, 40, 4, 591-607.

REIMOLD, W. U., KOEBERL, C., GIBSON, R. I., DRESSLER, B. O. (2005b): Economic Mineral Deposits in Impact Structures: A Review. In: *Tectonics*, ed. KOEBERL, C., HENKEL, H., Springer-Verlag, Berlin, 552 p.

RENNE, P. R., DEINO, A. L., HILGEN, F. J., KUPIER, K. F., MARK, D. F., MITCHELL III, W. S., MORGAN, L. E., MUNDIL, R., SMIT, J. (2013): Time Scales of Critical Events Around the Cretaceous-Paleogene Boundary. *Science*, 339, 6120, 684-687.

RODDY, D. J., DAVIS, L. K. (1977): Shatter cones formed in large-scale experimental explosion craters. In: *Impact and Explosion Cratering: Planetary and Terrestrial Implications*, ed. RODDY, D. J., PEPIN, R. O., MERRILL, R. B. Pergamon, New York, 1301 p.

RONDOT, J. (1975): Comparaison entre les astroblèmes de Siljan, Suède, et de Charlevoix, Quebec. *Uppsala Universitet Geologiska Institutionens Bulletin*, 6, 85-92.

ROSSBACH, T. J., HALL, J. C. (1998): Field Guide to The Late Devonian (Frasnian-Famennian) Extinction Event in the Catskill Delta of Virginia and West Virginia. The Paleontological Society and Western Carolina University, Charleston, West Virginia, 35 p.

RYDER, G., FASTOVSKY, D. E., GARTNER, S. (1996): The Cretaceous-Tertiary Event and Other Catastrophes in Earth History. Geological Society of America, Washington DC, 569 p.

SAGY, A., RECHES, Z., FINEBERG, J. (2002): Dynamic fracture by large extraterrestrial impacts as the origin of shatter cones. *Nature*, 418, 310-313.

SAGY, A., FINEBERG, J., RECHES, Z. (2004): Shatter cones: branched, rapid fractures formed by shock impact. *Journal of Geophysical Research* 109, B10209.

- SCHMIEDER, M., BUCHNER, E., SCHWARZ, W. H., TRIELOFF, M., LAMBERT, P. (2010): A Rhaetian $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age for the Rochechouart impact structure (France) and implications for the latest Triassic sedimentary record. *Meteoritics and Planetary Science*, 45, 8, 1225-1242.
- SHARPTON, V. L., DRESSLER, B. O., HERRICK, R. R., SCHNIEDERS, B., SCOTT, J. (1996): New constraints on the Slate Islands impact structure, Ontario, Canada. *Geology*, 24, 851-854.
- SHOEMAKER, E. M., GAULT, D. E., LUGN, R. V. (1961): Shatter cones formed by high speed impact in dolomite. U. S. Geological Survey Professional Paper, 424-D, 365–367.
- SHOEMAKER, E. M., SHOEMAKER, C. S. (1999): The Role of Collisions. In: *The New Solar System*, ed. BEATTY, J. K., PETERSEN, C. C., CHAIKIN, A. Cambridge Press, Cambridge, 421 p.
- SMITH, R. (2011): Dark days of the Triassic: Lost world. *Nature*, 479, 287-289.
- SPRAY, J. G., KELLY, S. P., ROWLEY, D. B. (1998): Evidence for a late Triassic multiple impact event on Earth. *Nature*, 392, 171-173.
- STOLPE, M. (1872): Om Siljanstranktens sandstenar. *Geologiska Föereningens i Stockholm Föerhandlingar*, 10 p.
- SVENSSON, N. B. (1971): Probable meteorite impact crater in central Sweden. *Nature*, 229, 90-92.
- SVENSSON, N. B. (1973): Shatter cones from the Siljan structure, central Sweden. *Geologiska Foreningens I Stockholm Forhendlingar*, 95, 139-143.
- THORSLUND, P. (1985): On the geology of the Siljan ring structure. 11 p.
- ULFSTEDT, A.-C. (1982): Geomorfologiska kartan 14 F Rättvik SV. *Naturgeografiska inst Stockholms universitet*.
- WALLISER, O. H. (1996): *Global Events & Event Stratigraphy in the Phanerozoic*. Springer-Verlag, Berlin, 333 p.

WEIHED, P., ARNDT, N., BILLSTREOM, K., DUCHESNE, J.-C., EILU, P., MARTINSSON, O., PAPUNEN, H., LAHTINEN, R. (2005): Precambrian geodynamics and ore formation: The Fennoscandian Shield. *Ore Geology Reviews*, 27, 273-322.

WEILAND, F., REIMOLD, W. U., GIBSON, R. L. (2006): New observations on shatter cones in the Vredefort impact structure, South Africa, and evaluation of current hypotheses for shatter cone formation. *Meteoritics & Planetary Science* 41, 11, 1737-1759.

WHITAKER, E. A. (1978): Galileo's Lunar Observations and the Dating of the Composition of the Sidereus Nuncius. *Journal of History Astronomy*, 155, 9, 155-169.

YRGÅRD, A. (1982): Geomorfologiska kartan 14 E Mora SO. Naturgeografiska inst Stockholms universitet.

ZHANG, P., RASMUSSEN, T. M., PEDERSEN, L. B. (1988): Electric resistivity structure of the Siljan impact region. *Journal of Geophysical Research*, 93, 6485-6501.

Internetové zdroje

[1] Earth Impact Database. Planetary and Space Science Centre. Dostupné z [www](http://www.passc.net/EarthImpactDatabase/index.html): <<http://www.passc.net/EarthImpactDatabase/index.html>>.

[2] The bedrock of Sweden. Geologic Survey of Sweden. Dostupné z [www](http://sgu.se/en/geology-of-sweden/the-bedrock-of-sweden/): <<http://sgu.se/en/geology-of-sweden/the-bedrock-of-sweden/>>.

[3] Average Weather For Borlänge, Sweden. WeatherSpark Beta. Dostupné z [www](http://weatherspark.com/averages/28953/Borlange-Dalarna-Sweden): <<http://weatherspark.com/averages/28953/Borlange-Dalarna-Sweden>>.

[4] Siljan. Earth Impact Database. The Planetary and Space Science Centre. Dostupné z [www](http://www.passc.net/EarthImpactDatabase/siljan.html): <<http://www.passc.net/EarthImpactDatabase/siljan.html>>.

[5] Stationskarte: Finnland, Schweden, Norwegen, Dänemark. Klimadiagramme weltweit. Dostupné z [www](http://www.klimadiagramme.de/pics/st_skan.html): <http://www.klimadiagramme.de/pics/st_skan.html>.

[6] Average Weather in Sveg, Sweden. World Weather & Climate Information. Dostupné z [www](http://www.weather-and-climate.com/average-monthly-Rainfall-Temperature-Sunshine,svag,Sweden): <<http://www.weather-and-climate.com/average-monthly-Rainfall-Temperature-Sunshine,svag,Sweden>>.

- [7] Average Weather For Östersund, Sweden. WeatherSpark Beta. Dostupné z www: <<http://weatherspark.com/averages/28945/Ostersund-Jamtland-Sweden>>.
- [8] Devonian extinctions. Encyclopædia Britannica. Dostupné z www: <<http://www.britannica.com/EBchecked/topic/1522869/Devonian-extinctions#ref1101092>>.
- [9] M4.6 - 41km NNE of AEIvdalen, Sweden. Earthquake Hazards Program, USGS. Dostupné z www: <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usb000sci4#general_summary>.
- [10] Sollerön. Ovensiljans Släktforskare. Dostupné z www: <<http://www.dalarotter.se/mora/solleron.html>>.
- [11] Zajímavosti a statistiky z historie Vasova běhu. Skimagazín. Dostupné z www: <<http://skimagazin.cz/zajimavosti-a-statistiky-z-historie-vasova-behu.html>>.
- [12] Impact Craters in the Solar System. Lunar and Planetary Institute. Dostupné z www: <<http://www.lpi.usra.edu/science/kiefer/Education/SSRG2-Craters/craterstructure.html>>.
- [13] SGU map generator. Geological Survey of Sweden. Dostupné z www: <http://apps.sgu.se/kartgenerator/maporder_en.html>.
- [14] Soil maps of Europe. Joint Research Centre – European Soil Portal. Dostupné z www: <http://eusoils.jrc.ec.europa.eu//library/maps/country_maps/metadata.cfm?mycountry=SE>.
- [15] Fourhorn sculpin (*Triglopsis quadricornis*). LUKE – Natural Resources Institute Finland. Dostupné z www: <http://www.rktl.fi/english/fish/fish_atlas/fourhorn_sculpin/>.
- [16] Map of Sweden Cities (polar stereographic). Wikimedia Commons. Dostupné z www: <[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Map_of_Sweden_Cities_\(polar_stereographic\).png](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Map_of_Sweden_Cities_(polar_stereographic).png)>
- [17] Geologic map of selected area. SGU map generator. Geological Survey of Sweden. Dostupné z www: <http://apps.sgu.se/kartgenerator/maporder_en.html>.

- [18] Depth to bedrock of selected area. SGU map generator. Geological Survey of Sweden. Dostupné z www: <http://apps.sgu.se/kartgenerator/maporder_en.html>.
- [19] How Thick is the Earth's Crust? USGS. Dostupné z www: <<http://earthquake.usgs.gov/data/crust/>>.
- [20] Tycho. Gazetteer of Planetary Nomenclature. Dostupné z www: <<http://planetarynames.wr.usgs.gov/Feature/6163>>.
- [21] Gale Crater's History Book. Mars Odyssey THEMIS (Thermal Emission Imaging System). Dostupné z www: <<http://themis.mars.asu.edu/feature/22>>.
- [22] Giant Flow of Impact Melt. Lunar Reconnaissance Orbiter Camera. Dostupné z www: <<http://www.lroc.asu.edu/news/index.php?/archives/601-Giant-Flow-of-Impact-Melt.html>>.
- [23] International Chronostratigraphic Chart "latest version (v 2014/10)". Geology Page. Dostupné z www: <<http://www.geologypage.com/2014/12/international-chronostratigraphic-chart.html#ixzz3UOzlg39w>>.
- [24] Harry scales the heights at the giant Moon crater Tycho. Sydney Observatory. Dostupné z www: <<http://www.sydneyobservatory.com.au/2013/harry-scales-the-heights-at-the-giant-moon-crater-tycho/>>.
- [25] ACT-REACT-QuickMap LRO/LROC. Dostupné z www: <<http://www.actgate.com/home/quickmap.htm>>.
- [26] Sunrise View of Tycho Crater's Peak. NASA. Dostupné z www: <http://www.nasa.gov/mission_pages/LRO/news/lro-tycho.html>.
- [27] STS009-48-3139. Gateway to Astronaut Photography of Earth, NASA. Dostupné z www: <<http://eol.jsc.nasa.gov/SearchPhotos/photo.pl?mission=STS009&roll=48&frame=3139>>.

Seznam příloh

Příloha č. 1 – Mapa hloubky horninového podloží v oblasti impaktního kráteru Siljan

Příloha č. 2 – Mapa kvartérních sedimentů v jihovýchodní oblasti kráteru Siljan

Příloha č. 3 – Geologická mapa jihovýchodní oblasti kráteru Siljan